



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
E.T.S.I. TOPOGRAFÍA, GEODESIA Y CARTOGRAFÍA



Modelización tridimensional de la pieza MNM-23 del Museo Naval de Madrid por métodos fotogramétricos

Elena Gallardo Merino

OCTUBRE 2013

TUTOR: Julián Aguirre de Mata



CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	pág. 5
1.1. Antecedentes	pág. 5
1.2. Introducción a la pieza	pág. 6
2. OBJETIVOS	pág. 8
3. METODOLOGÍA	pág. 9
3.1. Proyecto de toma fotográfica	pág. 9
3.2. Calibración de la cámara	pág. 11
3.2.1. Introducción	pág. 11
3.2.2. Proceso de calibración	pág. 16
3.2.3. Resultados de la calibración	pág. 20
3.3. Observación, cálculo y ajuste de la red topográfica	pág. 24
3.3.1. Observación de la red topográfica	pág. 25
3.3.2. Cálculo de la red topográfica	pág. 25
3.4. Apoyo fotogramétrico	pág. 28
3.4.1. Observación del apoyo fotogramétrico	pág. 28
3.4.2. Cálculo del apoyo fotogramétrico	pág. 30
3.5. Toma fotográfica	pág. 34
3.6. Orientación fotogramétrica	pág. 37
3.6.1. Orientación Interna	pág. 37
3.6.2. Orientación Externa	pág. 37
3.6.2.1. Introducción	pág. 37
3.6.2.2. Proceso de orientaciones	pág. 38
3.6.2.3. Resultados	pág. 41
3.7. Restitución	pág. 45
3.7.1. Introducción	pág. 45
3.7.2. Proceso de restitución	pág. 46
3.8. Modelado tridimensional	pág. 47
4. PRESUPUESTO	pág. 53
5. CONCLUSIONES	pág. 56



6. **ANEXOS**pág. 58

ANEXO I. Cálculos topográficos y fotogramétricos

ANEXO II. Planos

- Plano planta cubierta
- Plano planta casco
- Plano alzado estribor
- Plano alzado babor

ANEXO III. Secciones

- Sección longitudinal
- Secciones transversales



Agradecimientos

A mi familia, por el apoyo recibido durante todo este tiempo.

A todas mis compañeras y compañeros del laboratorio de fotogrametría, por su apoyo día a día y sus aportaciones a este proyecto.

A mi tutor, Julián Aguirre de Mata, por toda su ayuda recibida en cualquier momento y por su apoyo.

A Andrés Díez Galilea, por su ayuda prestada durante el proyecto.

Y a todos los que se me olvidan, Gracias!



1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la fotogrametría es, en determinados aspectos, paralelo al de la fotografía, por lo que desde mediados del siglo XIX los avances y aplicaciones se suceden cada vez con mayor rapidez.

La llegada de los dispositivos digitales ha logrado un abaratamiento de los gastos materiales que ahora pueden reducirse a un ordenador, una cámara fotográfica digital y un programa informático adecuado. Actualmente la fotogrametría de objeto cercano se encuentra en plena expansión desarrollando constantemente nuevas aplicaciones, equipos y sistemas.

La base de la fotogrametría, incluida la fotogrametría de objeto cercano, es la triangulación mediante la que es posible el cálculo de las coordenadas tridimensionales de un objeto a partir de información obtenida de fotografías. Cuando para la triangulación no es posible el conocimiento exacto de la localización de las estaciones, es posible conocer su localización exacta con el apoyo de la topografía.

En fotogrametría también habrá que tener en cuenta los factores que afectan a la precisión del trabajo, tales como la geometría de la red fotogramétrica, o localización de las cámaras y el número de imágenes, las características de las cámaras utilizadas, su estabilidad geométrica, los ajustes fotográficos utilizados, etc...

1.1. Antecedentes

Actualmente se está implantando un método por el que ofrecer al público una serie de productos de un modo virtual. Si se combina esto con la fotogrametría, se obtiene que el producto quede representado con dimensiones reales, pudiendo alcanzar precisiones muy elevadas.

Uno de los mercados en el que se está implantando este método es el de documentación geométrica de piezas de valor para el patrimonio. Este es el caso del Museo Naval de Madrid, al que se le ofrece tener una biblioteca virtual de las piezas que posee para la exposición y conservación de las mismas, por lo que en este proyecto pretende buscar una solución para el Museo Naval de Madrid.

En conversaciones con representantes del Museo, se solicita la reproducción virtual del modelo. En el Museo ya disponen de algunos modelos virtuales de otras piezas, pero no llegan a conseguir la representación de todos los detalles que pueden llegar a tener estas piezas, por lo que nos solicitan que realicemos un modelo para comprobar si con la metodología que nosotros empleamos (fotogrametría de objeto cercano) somos capaces de llegar a la representación de los detalles. Además nos piden que la representación del modelo tenga una precisión de 1mm.



1.2. Introducción de la pieza

El modelo objeto de este proyecto es concretamente la pieza MNM-23 del Museo Naval de Madrid, esta pieza corresponde a la Fragata “Santa Rosalía” de 1767, con un porte de 34 cañones.

La pieza se encontró en un lamentable estado de conservación y en 1995 el restaurador-modelista del Museo Naval de Madrid, Miguel Godoy Sánchez, hizo un gran trabajo de restauración de la misma para poder contemplar con auténtico deleite cada uno de los cientos de detalles, que por dentro tenía una fragata del siglo XVIII, una obra perfecta de ingenio, cálculo, estructuras, medidas y estudio, a la vez que arte; todo ello combinado en su justa medida es un claro ejemplo y una gran elección de arquitectura naval de la época.

La pieza se encontró tirada en la basura en gran parte destrozada. Entre muchas de las piezas destrozadas, se puede observar en su costado de babor la carencia de todas las cuadernas que conforman la estructura del casco, las piezas estaban perdidas o en muy mal estado.

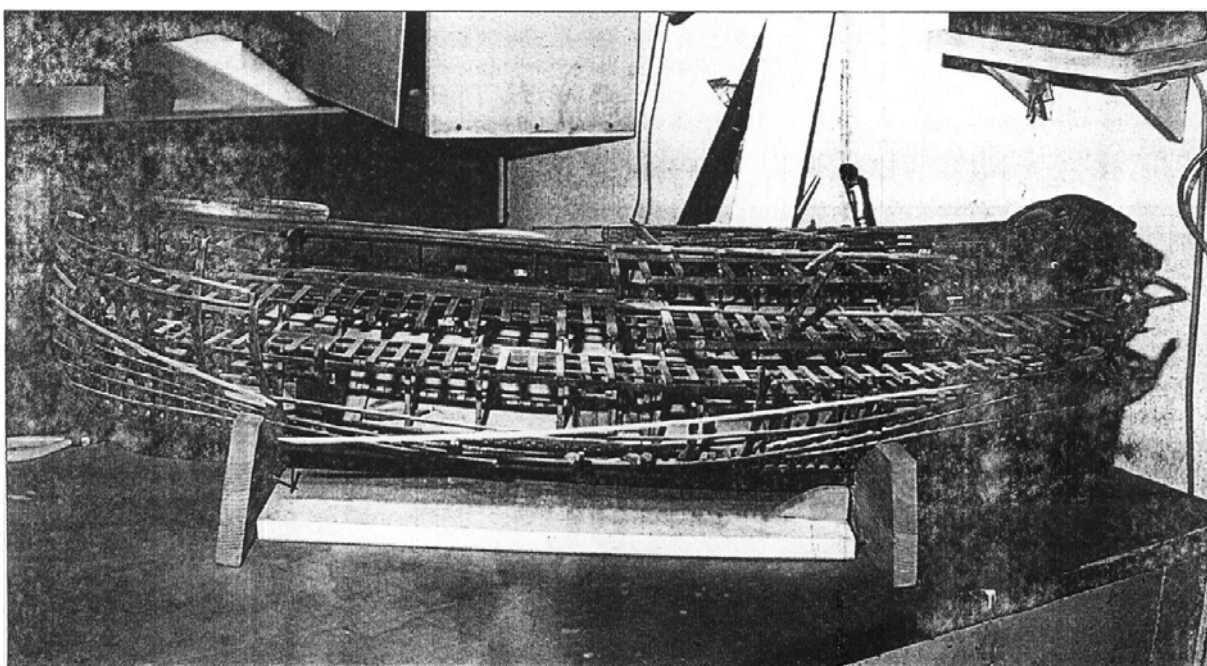


Figura 1. Vista babor. Antes de restauración.



También había otras estructuras que necesitaban un gran trabajo de restauración, como se puede observar en las siguientes imágenes:

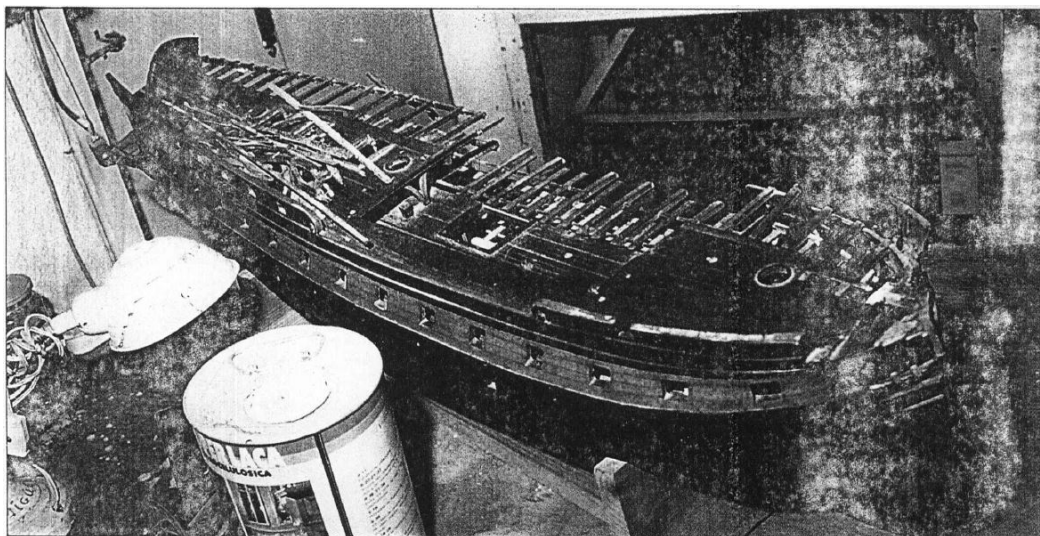


Figura 2. Vista cubierta. Antes de restauración.

A continuación se muestra la popa antes y después de la restauración:

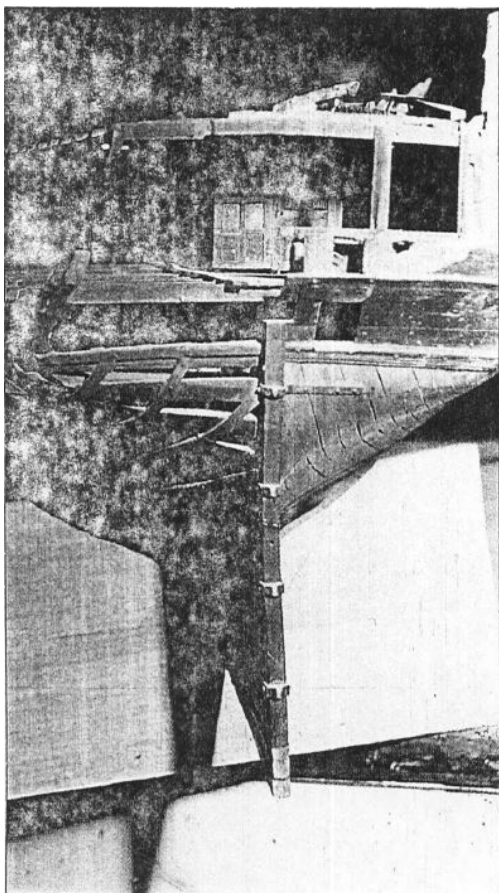


Figura 3. Vista popa. Antes de restauración.

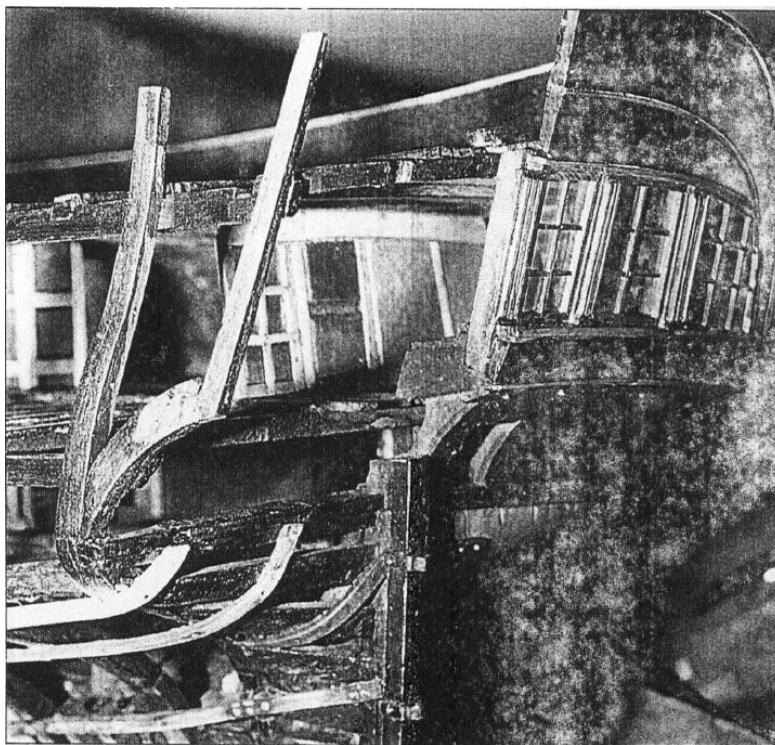


Figura 4. Vista popa. Después de restauración.



Finalmente la restauración se completó con gran éxito consiguiendo una gran representación de este modelo.

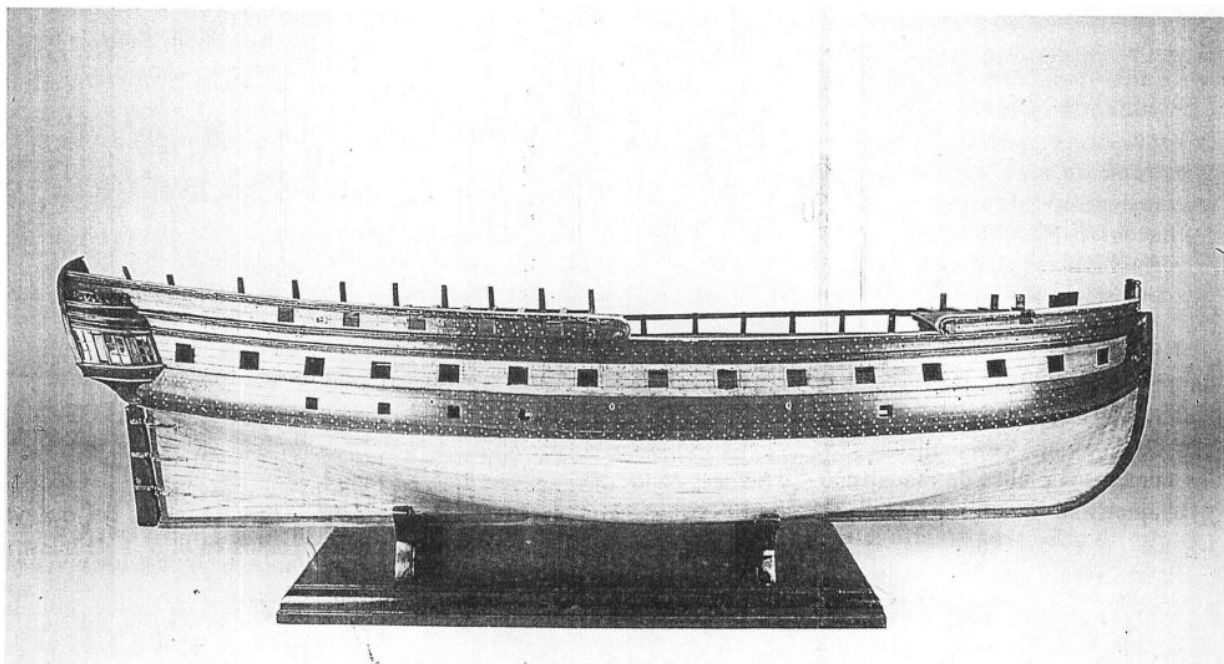


Figura 5. Vista estribor. Después de restauración.

En la actualidad este modelo está expuesto al público en el Museo Naval de Madrid



Figura 6. Vista estribor. Actualidad.

2. OBJETIVOS

En el siguiente proyecto se pretende obtener el modelo tridimensional de una pieza del Museo Naval de Madrid, el modelo MNM-23, correspondiente a una fragata de 34 cañones, de dimensiones aproximadas 110*30*39 cm, a partir de fotogrametría de objeto cercano y topografía.



El carácter no invasivo de la fotogrametría y la alta precisión que ofrece hace que este sea un método muy apropiado para este tipo de trabajos.

Apoyándonos en estas técnicas, se pretende obtener una precisión entorno al milímetro en el modelo final.

Así mismo se investigará y describirá una metodología de trabajo eficiente, rápida y de bajo coste que pretende sustituir otras metodologías utilizadas en este tipo de proyectos.

3. METODOLOGÍA

3.1. Proyecto de toma fotográfica

Para llevar a cabo el proyecto se necesita una previa planificación en la que se definan los parámetros de las distintas etapas del proceso, y los condicionantes del proyecto, el entorno y la toma fotográfica. Estos permitirán alcanzar los objetivos deseados siempre y cuando en las fases posteriores se trabaje con el mismo criterio.

En primer lugar, se parte de la base de que la reproducción del modelo, por imposición del Museo, tiene que tener una precisión de 1 mm. Este será nuestro dato de partida para planificar todo el proyecto de toma fotográfica, pues hay que definir una serie de parámetros que condicionaran el que se alcance, o no, la precisión deseada.

Además, hay que contar con la cámara que se utilizará para realizar la toma fotográfica y de sus características.



Figura 7. Cámara Olympus E-500.

Características de la cámara Olympus E-500 de 8MPix, con un sensor de 3264*2448 píxeles y 5,31 micras de resolución, dotada de un objetivo ZUIKO DIGITAL 14-45 mm.



La focal nominal utilizada fue 14 mm, elegida por dos razones, la primera es que con una focal de 14 mm (focal pequeña) tenemos una amplitud de campo visual bastante amplia, por lo que así reduciremos el número de tomas a realizar. La otra razón por la que se eligió esta distancia focal es porque se trata de uno de los extremos del objetivo, así, si se tienen que repetir trabajos para este proyecto nos resultará más fácil colocar el objetivo en el lugar deseado, en el extremo. Además, por seguridad, para evitar movimientos en el objetivo, se fijó este con una cinta autoadhesiva.

Por último se analiza el entorno donde se realizará la toma. Atendiendo a la iluminación, se decidió utilizar una apertura del diafragma de F11. La decisión de utilizar una apertura del diafragma u otra obedece a una cuestión de incluir distorsión o difracción. La distorsión es algo que se va a calcular en la calibración, por lo que el hecho de que haya más o menos, no influye en la elección final. Sin embargo, la presencia de difracción redundaría en una falta de nitidez en la imagen, de la cual sí deberíamos huir si queremos conservar una resolución real en la misma y poder realizar medidas precisas sobre ella. Cuanto más se cierre el diafragma (mayor número f) más difracción se va a incluir, más difusa va a quedar la imagen.

Atendiendo a estos parámetros elegidos, resulta que tenemos que emplear una distancia de alejamiento al objeto de 850 mm.

Todo ello se utiliza para calcular los parámetros que regirán la toma fotográfica en el presente proyecto. Estos parámetros se han calculado a partir de los datos de entrada anteriormente explicados y con la ayuda de una hoja Excel.

Primeramente, calculamos el tamaño del pixel (resolución) en el objeto a partir del tamaño del sensor de la cámara en píxeles y en milímetros (datos que tenemos por los parámetros técnicos de la cámara).

$$\text{Resolución} = \frac{\text{Tam. Sensor (mm)}}{\text{Tam. Sensor (pixel)}} = 5,31 \text{ micras}$$

También podemos obtener la escala de la imagen a partir del alejamiento y la distancia focal

$$E = \frac{\text{Alejamiento}}{f} = 61$$

Por otra parte, fijando el recubrimiento longitudinal en un 76% se obtiene un valor para la base aérea o avance entre fotogramas de:

$$\text{Base} = b \times \text{Escala} = 0,252 \text{ m}$$

$$b = \text{AnchoSensor} \times \text{Avance (\%)} = 4,152 \text{ mm}$$



A continuación se puede ver la hoja Excel con todos los cálculos realizados para obtener los parámetros del proyecto de toma fotográfica.

OLYMPUS E500			
	Alto	Ancho	
Tamaño sensor	2448	3264	Píxeles
Tamaño sensor	13	17,3	Milímetros
Círculo de confusión	0,015		Milímetros
Tamaño píxel objeto	5,31		Micras
Tamaño sensor objeto	0,789	1,050	Metros
Distancia focal	14		Milímetros
Alejamiento	0,85		Metros
Diafragma	11		
Hiperfocal	1,20		Metros
Distancia cercana y lejana	0,50	2,87	Metros
Fotobase	4,152		Milímetros
Base aérea	0,252		Metros
Relación Base/Alejamiento	1 / 3,4		
Error altimétrico	0,0008		Metros
Error planimétrico	0,0003		Metros
Tamaño píxel objeto	0,322		Milímetros
	Alto	Ancho	
Recubrimiento total	0,553	0,798	Metros
Distancia avance	0,252		Metros
Separación pasadas	0,735		Metros
Dimensiones del objeto	0,39	1,10	Metros
Número de pasadas	1		Pasadas
Número de fotos/pasada	5		Fotos
Escala: 1/	61		Adimensional
Recubri. Longitudinal	76		Porcentaje
Avance	24		Porcentaje
Recubri. Transversal	30		Porcentaje
Separación pasadas	70		Porcentaje

3.2. Calibración de la cámara

3.2.1. Introducción

En fotogrametría, siempre que se trabaje con una cámara convencional, es decir, no métrica, es necesario obtener la calibración de la misma, esto es, obtener los parámetros de orientación interna de la cámara, que permiten reconstruir la forma del haz perspectivo.

Estos parámetros de orientación interna de la cámara son:

- Distancia focal calibrada

Representa la distancia desde la pupila de salida del objetivo al punto principal en el plano focal.

Si un haz de rayos que se propaga en la dirección del eje óptico incide sobre la superficie esférica de una lente delgada, los rayos se reflejan o refractan de forma que se cortan en dos puntos F y F' situados sobre el eje óptico. La distancia entre esos puntos llamados focos y los planos principales externos e internos de las lentes (H_1 y H_2) se denominan longitudes focales internas y externas (f y f'), mientras que z y z' son las distancias al objeto y a la imagen, que en un sistema óptico ideal sería también la distancia principal.

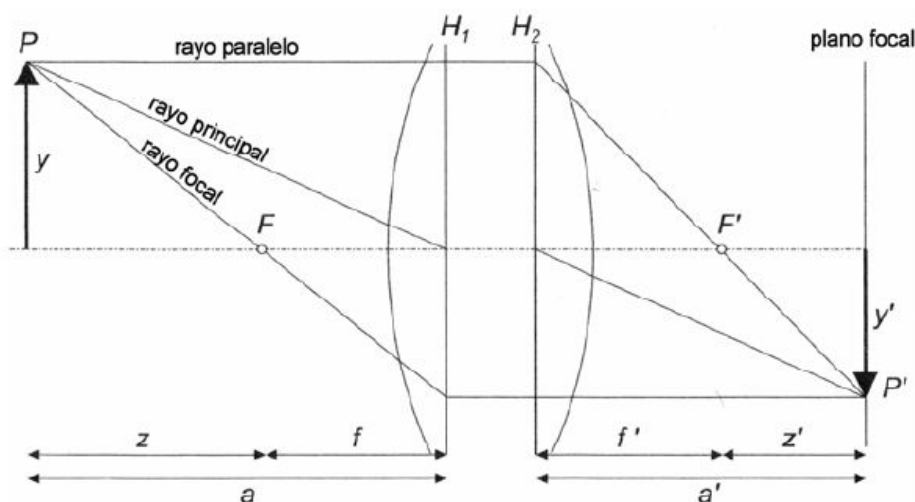


Figura 8. Construcción geométrica de un sistema de lentes delgado ideal.

Matemáticamente se define el centro de perspectiva como el punto de la perspectiva central a través del que pasan todas las líneas de los rayos de luz. La distancia entre el centro de perspectiva O_m y el plano focal se denomina distancia principal o distancia focal c . A diferencia del centro de perspectiva, que es único para un conjunto de lentes, se pueden definir dos centros ópticos; el de entrada y el de salida (O y O').

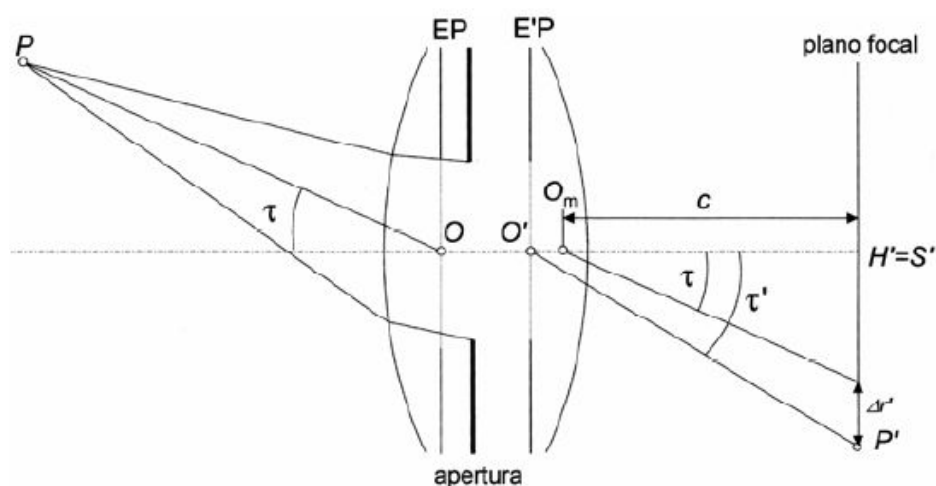


Figura 9. Centro de perspectiva y distancia principal en un sistema de lentes real.

En el caso ideal de la figura 8 el ángulo de incidencia τ es igual al ángulo de salida τ' y la distancia principal c es igual a la distancia a la imagen a' . Debido a que generalmente no coinciden los planos principales con la posición real de los centros ópticos de las lentes un rayo de luz que entra con un ángulo τ sale con un ángulo τ' distinto lo que origina un desplazamiento del centro de perspectiva, no coincidiendo en este caso la distancia principal con la distancia a la imagen. Esta falta de coincidencia entre planos principales y los centros ópticos de las lentes también es la causa de la aparición de la distorsión radial.

o Posición del punto principal de mejor simetría

El punto principal queda definido matemáticamente como la intersección de la línea perpendicular dirigida desde el centro de proyección hasta el plano de la imagen. Es el punto del plano focal que distribuye las distorsiones de forma simétrica.

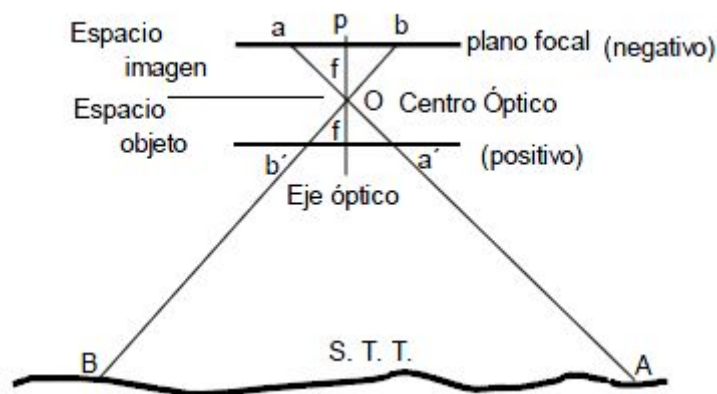


Figura 10. Posición del punto principal de simetría.

○ Distorsión radial

La distorsión radial constituye la mayor fuente de error en la mayoría de las cámaras. La distorsión se produce a lo largo de líneas concéntricas desde el punto principal por toda la imagen y se incrementa con la distancia a éste.

El cálculo de la distorsión radial (Δr) se realizará por el método de aproximación a un polinomio de la distorsión radial de la lente. Este método consiste en aproximar la curva de distorsión a un polinomio de la forma:

$$\Delta r = a_1 r + a_2 r^3 + a_3 r^5 + a_4 r^7 \dots$$

Donde Δr es la distorsión radial de la lente, “r” es la distancia radial al punto principal. Los coeficientes a_1, a_2, a_3, a_4 definen la forma de la curva. Los valores de estos coeficientes se obtienen por aplicación de la metodología de mínimos cuadrados.

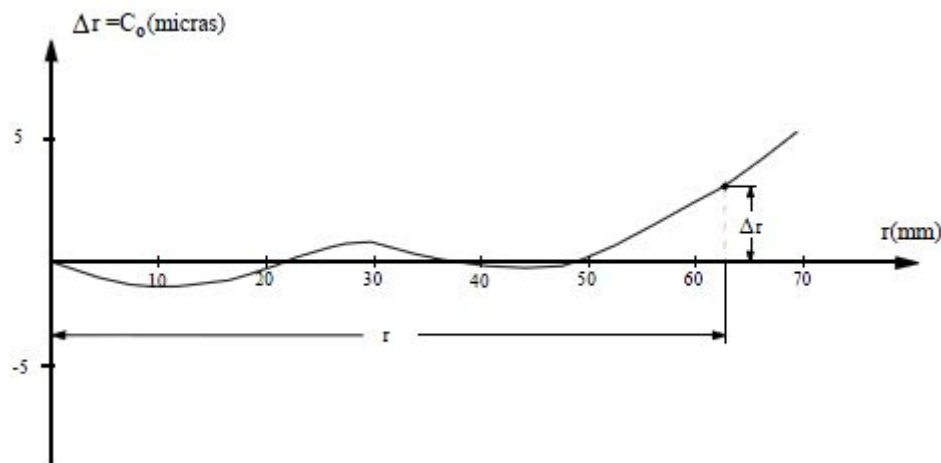


Figura 11. Variación de la distorsión en función de la distancia radial.

En el gráfico se observa como aumenta la distorsión al aumentar la distancia al punto principal de la imagen

○ Distorsión tangencial

La distorsión radial asimétrica frecuentemente llamada tangencial, está relacionada por la falta de alineamiento de los elementos de las lentes en el interior del objetivo. Esta distorsión puede ser compensada por la siguiente función:

$$\Delta x = P_1 \left(r^2 + 2(x' - x_p)^2 \right) + 2P_2(x' - x_p)(y' - y_p)$$

$$\Delta y = P_2 \left(r^2 + 2(y' - y_p)^2 \right) + 2P_1(x' - x_p)(y' - y_p)$$

Comparado con la distorsión radial, la distorsión tangencial, cuantitativamente es muy inferior por lo tanto, suele ser determinada solamente cuando se requiere una alta precisión.

Uno de los métodos de calibración más empleados en fotogrametría digital de objeto cercano es el de calibración con plantilla. Este método está fundamentado en el uso de una malla adecuada y estable con dianas cuyas coordenadas servirán posteriormente para el ajuste en bloque. El trabajo de calibración consistirá en hacer una serie de tomas en varias estaciones asegurando las intersecciones de los rayos y que la plantilla quede ajustada en el formato de la imagen.

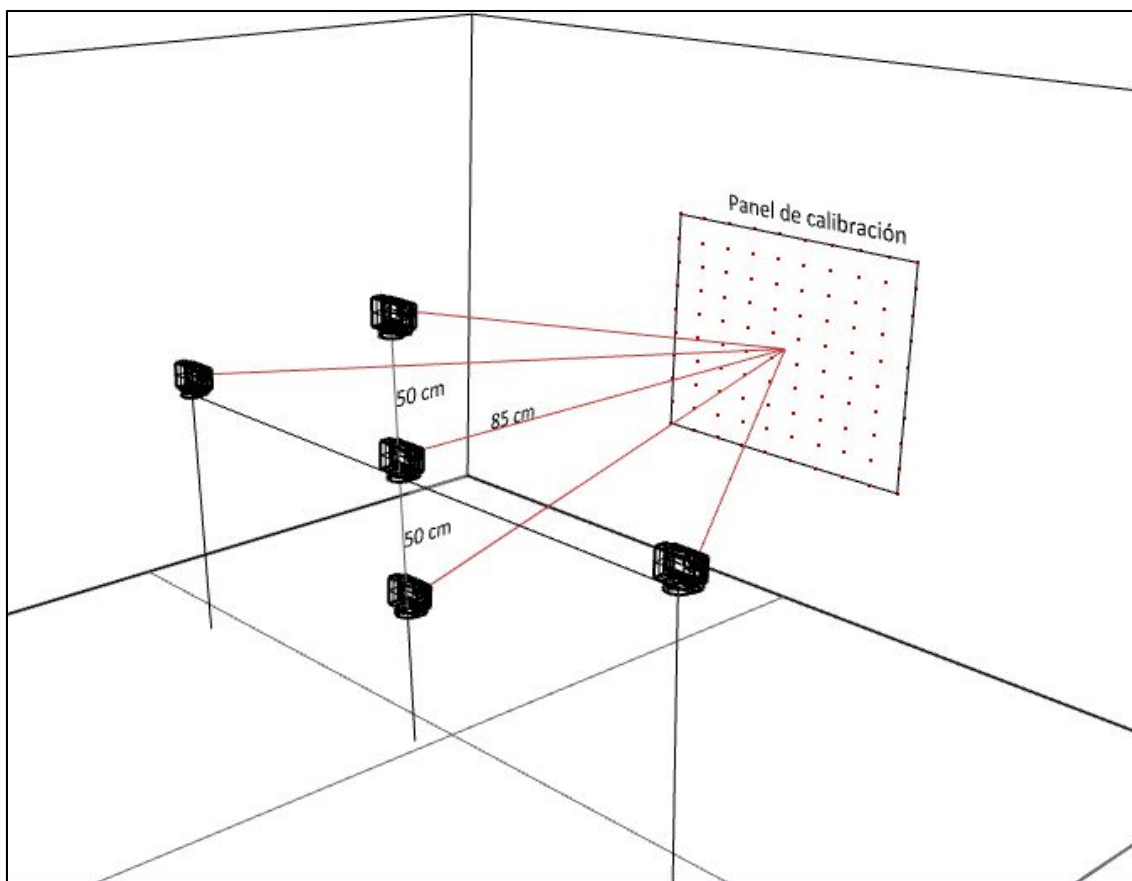


Figura 12. Posiciones de la cámara para la calibración.



3.2.2. Proceso de calibración

En fotogrametría, nos podemos encontrar un amplio abanico de distintas metodologías de calibración siguiendo distintos procesos de obtención de los parámetros; en este proyecto, se optó por seguir el proceso de calibración propio del software que se iba a utilizar, pues proporcionaría los datos internos según su propio modelo de distorsión y escritos en un fichero con su propia sintaxis. Se trata de un proceso de calibración con plantilla, ya definido anteriormente.

El software en cuestión es “Image Master”, de TOPCON, con una aplicación para determinar la calibración de la cámara siguiendo los siguientes pasos:

1. Impresión del panel de calibración, para el que se tiene en cuenta el tamaño de este, de forma que ocupe el máximo del formato de la fotografía. El panel consta de una serie de marcas específicas, en total, 145 puntos y 5 cuadrados de los cuales se conocen sus coordenadas aproximadas.

Teniendo en cuenta que el sensor tendría un tamaño en el espacio objeto de unos 80 cm x 1 m y que las imágenes se iban a realizar a una distancia de 85 cm (igual que en la toma) se imprimió la plantilla a tamaño A0 (84.1 cm x 118.9 cm), a fin de que todo el formato de la imagen, como ya se ha explicado, quede cubierto por la plantilla en la vista frontal.

Este panel se colocó en una superficie lisa, una pared, para reducir al máximo las posibles ondulaciones del mismo.

2. Realización de una serie de fotografías o imágenes del panel, en total 5 imágenes desde diferentes puntos de vista.

Las imágenes se realizaron en las mismas condiciones de enfoque que se hicieron las de la pieza, por lo tanto, se hicieron a una distancia del panel de 85 cm, con una abertura de diafragma de F11.0 y con una distancia focal de 14 mm. Con estas características se realizó el enfoque de la cámara para a continuación realizar las imágenes.

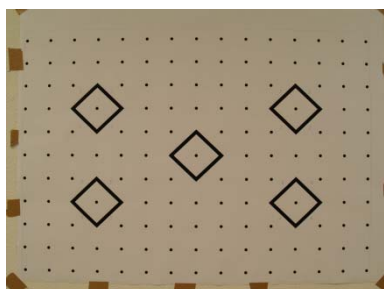


Figura 13. Frontal.

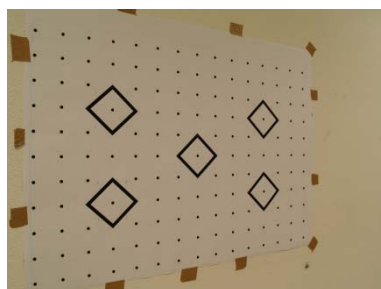


Figura 14. Izquierda.

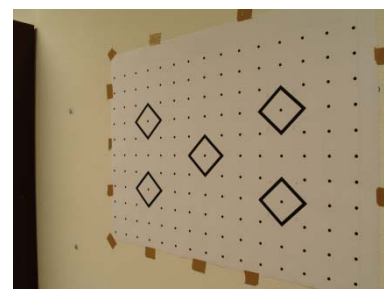


Figura 13. Derecha.

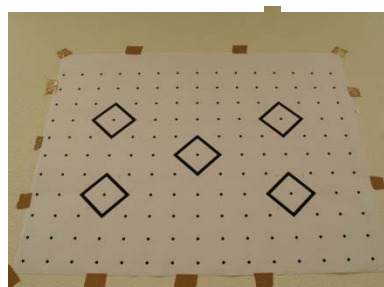


Figura 16. Abajo.

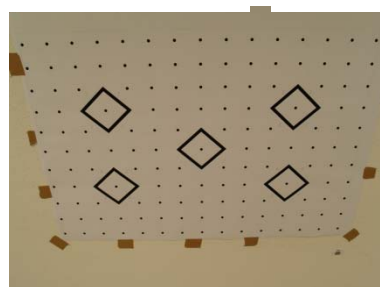


Figura 17. Arriba.

3. Introducción de las imágenes en el software de calibración. El propio software hace un reconocimiento de las imágenes y detecta los 145 puntos de panel de calibración en cada imagen. Hay que hacer una comprobación de que el programa esté detectando los puntos correctamente, dentro de las desviaciones permitidas por el software.

Para la detección de estos puntos, el programa realiza un proceso de correlación automática, esto se basa en localizar un determinado punto dado, con unas determinadas características, en una imagen determinada. Pero si tenemos dos imágenes de la misma zona (como es nuestro caso) de tamaño $M \times N$ píxeles y seleccionamos un píxel en una de ellas, el posible área de búsqueda del píxel en la otra imagen será el propio tamaño de la imagen; por lo que para simplificar el problema, hay que reducir el área de búsqueda.

En un par fotogramétrico, sabemos que los puntos homólogos se encuentran en las “líneas epipolares”, con esto, el número de búsquedas y operaciones a realizar se reduce de forma considerable. Además no sólo buscaremos la correlación de un píxel en la otra imagen, trataremos de buscar la correlación de un píxel y “sus vecinos” en la otra imagen.

Deberemos aplicar un coeficiente de correlación, este es un estadístico que nos da una estimación de como dos series numéricas se parecen entre sí. Es una cantidad que varía de -1 a 1 dependiendo del grado de similitud de las dos series. Si las series son idénticas, vale 1 y si las series son “anti-idénticas”, vale -1 . Su valor es cero cuando ambas series no se parecen.

Se trata, por tanto de calcular un coeficiente de correlación del patrón con cada uno de los píxeles del área de búsqueda, y estimar su valor. Si ese valor es superior a un mínimo, y buscamos el máximo de todos ellos, tendremos el punto homólogo.

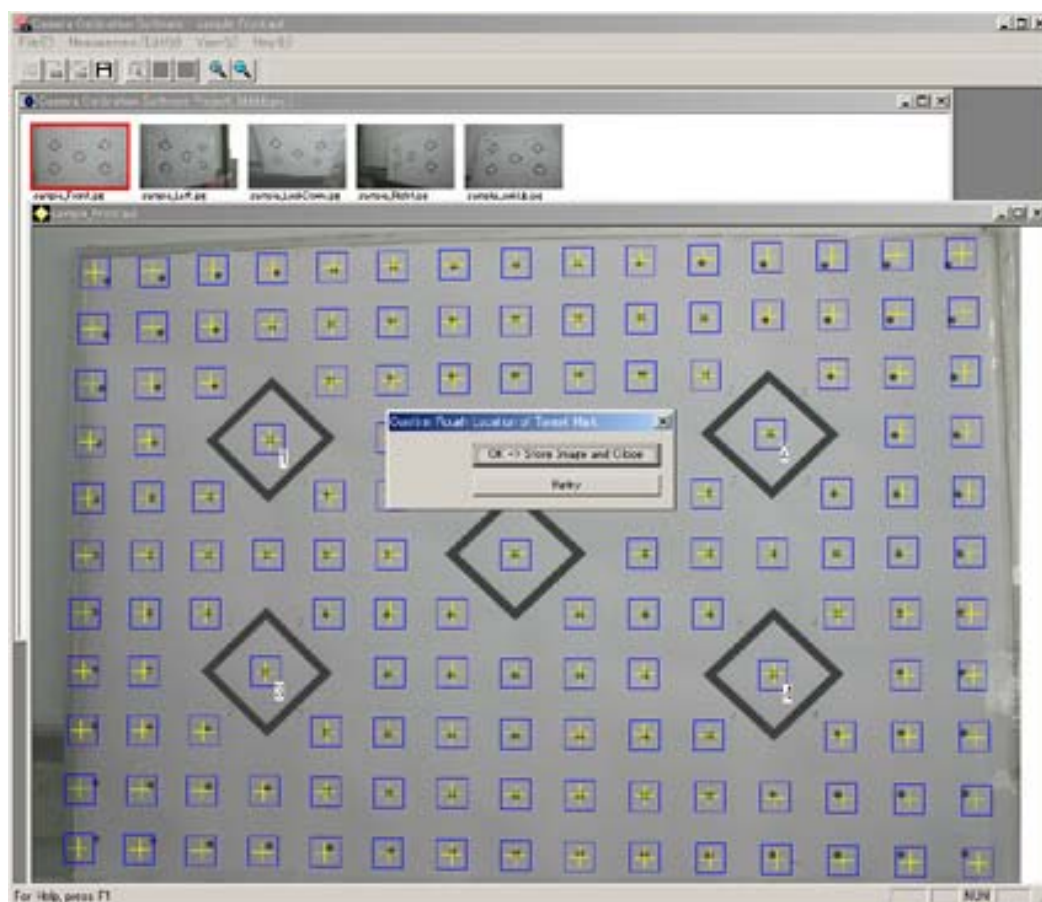


Figura 18. Procesado de imágenes en Image Master.

4. Cálculo de los parámetros de la calibración. El programa realiza una serie de cálculos con las coordenadas medidas en cada imagen y las coordenadas que el propio software tiene del panel de calibración obteniendo un fichero con toda la información de los cálculos. En este fichero aparecen las coordenadas de todos los puntos del panel de calibración en cada imagen medidas en pixel y el residuo de cada una de ellas, para con estas, calcular las coordenadas medias de estos puntos en metros, con su residuo.

Hay que comprobar que en cada imagen el residuo total (en pixel) de las coordenadas no sea superior a 0.25 pixel. Si esto es así, se comprueban las coordenadas y los residuos calculados en metros de cada uno de los puntos, el residuo final no debería ser mayor de 0.5 mm.

En este fichero también se dan los resultados de las distorsiones de las lentes (radial y tangencial) y la posición del punto principal de mejor simetría de la cámara, además de la posición de la cámara y orientación en cada una de las imágenes.

El modelo de distorsión seguido por este software es el siguiente:

Para la distorsión radial tenemos que obtener los coeficientes de distorsión K_1 y K_2 :



$$dx = K_1(x' - x_p)r^2 + K_2(x' - x_p)r^4$$

$$dy = K_1(y' - y_p)r^2 + K_2(y' - y_p)r^4$$

Donde:

K_1, K_2 = Coeficientes de distorsión radial (incógnitas)

dx, dy = Componentes x, y de la distorsión, conocidas para cada distancia radial r

x', y' = Coordenadas de cada marca de la plantilla

x_p, y_p = Coordenadas del punto principal

r = Distancia radial desde el punto principal x_p, y_p

Para la distorsión tangencial se aplicará el siguiente modelo:

$$\Delta x = P_1 \left(r^2 + 2(x' - x_p)^2 \right) + 2P_2(x' - x_p)(y' - y_p)$$

$$\Delta y = P_2 \left(r^2 + 2(y' - y_p)^2 \right) + 2P_1(x' - x_p)(y' - y_p)$$

Donde:

P_1, P_2 = Coeficientes de distorsión tangencial (incógnitas)

$\Delta x, \Delta y$ = Componentes x, y de la distorsión, conocidas para cada distancia radial r

x', y' = Coordenadas de cada marca de la plantilla

x_p, y_p = Coordenadas del punto principal

r = Distancia radial desde el punto principal x_p, y_p

Estos modelos se aplican a las coordenadas obtenidas de los puntos del panel de calibración para corregir cada una de ellas de las distorsiones radial y tangencial.



3.2.3. Resultados de la calibración

Cuando el programa termina de calcular la calibración, obtenemos una pantalla que nos muestra los residuos obtenidos del proceso de calibración. El programa realiza un juicio de si la calibración ha sido correcta o no, y para que sea correcta el residuo del procesamiento de las imágenes para todos los puntos debe ser inferior a 0,25 píxeles.

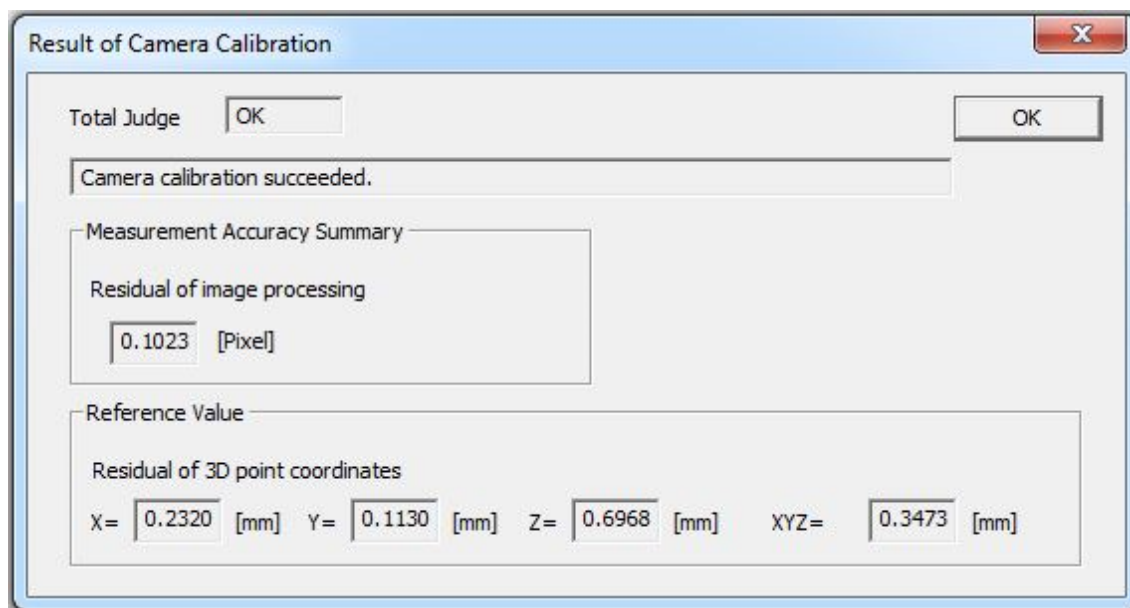


Figura 19. Resultados calibración Image Master.

Después de aceptar este proceso, el programa ofrece un fichero en el que se desglosan todos los cálculos realizados y los resultados obtenidos en ellos.



Primeramente, podemos ver las coordenadas de cada punto del panel de calibración que el mismo tiene establecidas:

[Control Points]			
Accuracy [m] 0.00566 0.00566 0.00566			
Control Point Coordinates			
PointName	X[m]	Y[m]	Z[m]
1	0.21207	-0.19988	0.00000
2	0.77759	-0.19988	0.00000
3	0.21207	-0.46639	0.00000
4	0.77759	-0.46639	0.00000
5	0.49483	-0.33314	0.00000
-11	0.27486	-0.19988	0.00000
-21	0.14928	-0.19988	0.00000
-31	0.21207	-0.14019	0.00000
-41	0.21207	-0.25957	0.00000
-12	0.84038	-0.19988	0.00000
-22	0.71480	-0.19988	0.00000
-32	0.77759	-0.14019	0.00000
-42	0.77759	-0.25957	0.00000
-13	0.27486	-0.46639	0.00000
-23	0.14928	-0.46639	0.00000
-33	0.21207	-0.40670	0.00000
-43	0.21207	-0.52608	0.00000
-14	0.84038	-0.46639	0.00000
-24	0.71480	-0.46639	0.00000
-34	0.77759	-0.40670	0.00000
-44	0.77759	-0.52608	0.00000
-15	0.55762	-0.33314	0.00000
-25	0.43204	-0.33314	0.00000
-35	0.49483	-0.27345	0.00000
-45	0.49483	-0.39282	0.00000
101	0.00000	0.00000	0.00000
102	0.07069	0.00000	0.00000
103	0.14138	0.00000	0.00000
104	0.21207	0.00000	0.00000
105	0.28276	0.00000	0.00000
106	0.35345	0.00000	0.00000
107	0.42414	0.00000	0.00000
108	0.49483	0.00000	0.00000
109	0.56552	0.00000	0.00000
110	0.63621	0.00000	0.00000
111	0.70690	0.00000	0.00000
112	0.77759	0.00000	0.00000
113	0.84828	0.00000	0.00000
114	0.91897	0.00000	0.00000
115	0.98966	0.00000	0.00000
116	0.00000	-0.06663	0.00000
117	0.07069	-0.06663	0.00000
118	0.14138	-0.06663	0.00000
119	0.21207	-0.06663	0.00000
120	0.28276	-0.06663	0.00000
121	0.35345	-0.06663	0.00000
122	0.42414	-0.06663	0.00000
123	0.49483	-0.06663	0.00000
124	0.56552	-0.06663	0.00000
125	0.63621	-0.06663	0.00000
126	0.70690	-0.06663	0.00000
127	0.77759	-0.06663	0.00000
128	0.84828	-0.06663	0.00000
129	0.91897	-0.06663	0.00000
130	0.98966	-0.06663	0.00000
131	0.00000	-0.13325	0.00000
132	0.07069	-0.13325	0.00000
133	0.14138	-0.13325	0.00000
134	0.28276	-0.13325	0.00000
135	0.35345	-0.13325	0.00000
.			
.			
.			
.			

Figura 20. Coordenadas de cada punto del panel.



Después podemos ver las coordenadas de los mismos puntos que antes, pero esta vez, las que se han medido en cada una de las imágenes (en píxeles):

[Image Coordinates]				
Image 1				
Image Name 27022013_01				
Image Coordinates and Residuals				
PointName	x[pixel]	y[pixel]	dx[pixel]	dy[pixel]
1	761.770	845.930	-0.015	0.060
2	2509.440	846.940	0.050	0.052
3	760.620	1676.560	0.007	-0.015
4	2515.030	1667.030	0.046	-0.011
5	1642.320	1259.210	-0.029	0.028
102	352.810	249.280	-0.061	0.112
103	562.830	244.780	-0.032	-0.021
104	774.970	240.910	-0.002	-0.050
105	988.910	237.280	-0.016	0.031
106	1204.770	234.650	-0.006	0.043
107	1421.950	233.320	0.037	0.083
108	1639.380	233.760	-0.035	0.054
109	1856.070	235.920	-0.036	0.096
110	2071.000	239.550	0.011	0.001
111	2283.740	243.930	0.059	0.064
112	2493.270	249.420	-0.046	-0.006
113	2699.740	255.210	-0.135	0.008
114	2902.540	261.730	-0.131	0.002
115	3102.450	268.050	0.146	0.131
117	346.580	447.560	-0.059	0.063
118	556.930	443.090	0.029	0.059
119	770.000	439.930	-0.019	-0.014
120	984.940	436.180	-0.012	0.142
121	1202.060	433.920	-0.149	0.049
122	1420.910	433.050	-0.054	0.126
123	1639.890	433.750	-0.029	0.069
124	1858.000	435.110	-0.015	0.218
125	2074.740	437.240	-0.055	0.099
126	2288.800	441.040	0.038	0.077
127	2498.640	446.270	-0.064	0.013
128	2706.430	450.790	-0.071	-0.024
129	2908.680	456.880	-0.123	-0.056
130	3109.450	461.640	0.040	0.108
131	131.300	650.890	-0.069	0.143
132	341.630	648.510	-0.011	0.000
133	551.560	644.460	0.011	0.001
134	981.400	638.700	-0.048	0.019
135	1200.040	636.870	-0.070	0.045
.				
.				
.				

Figura 21. Coordenadas medidas del panel.



Finalmente, obtenemos las coordenadas ajustadas medidas en las 5 imágenes, y los residuos respecto a las coordenadas iniciales del programa:

[Calculated coordinates]						
Calculated Coordinates and Residuals						
PointName	X[m]	Y[m]	Z[m]	DX[m]	DY[m]	DZ[m]
1	0.2121777	-0.1998028	0.0001724	0.0001088	0.0000791	0.0001724
2	0.7774055	-0.1998898	0.0004131	-0.0001807	-0.0000079	0.0004131
3	0.2120664	-0.4662661	0.0004549	-0.0000025	0.0001250	0.0004549
4	0.7777340	-0.4663269	0.0004273	0.0001478	0.0000643	0.0004273
5	0.4948740	-0.3330234	0.0003436	0.0000464	0.0001131	0.0003436
102	0.0709400	-0.0000911	-0.0003678	0.0002503	-0.0000911	-0.0003678
103	0.1417024	-0.0001234	-0.0003380	0.0003231	-0.0001234	-0.0003380
104	0.2122831	-0.0001098	-0.0006726	0.0002142	-0.0001098	-0.0006726
105	0.2828836	-0.0001131	-0.0005863	0.0001250	-0.0001131	-0.0005863
106	0.3535216	-0.0001495	-0.0003051	0.0000733	-0.0001495	-0.0003051
107	0.4241480	-0.0001537	-0.0001350	0.0000100	-0.0001537	-0.0001350
108	0.4947751	-0.0001673	-0.0001703	-0.0000524	-0.0001673	-0.0001703
109	0.5653987	-0.0001613	-0.0005274	-0.0001185	-0.0001613	-0.0005274
110	0.6359924	-0.0002022	-0.0007110	-0.0002145	-0.0002022	-0.0007110
111	0.7066573	-0.0002037	-0.0006985	-0.0002393	-0.0002037	-0.0006985
112	0.7772933	-0.0002385	-0.0005892	-0.0002929	-0.0002385	-0.0005892
113	0.8479027	-0.0002777	-0.0001694	-0.0003732	-0.0002777	-0.0001694
114	0.9185039	-0.0003101	-0.0000523	-0.0004616	-0.0003101	-0.0000523
115	0.9892257	-0.0002262	-0.0000969	-0.0004294	-0.0002262	-0.0000969
117	0.0708686	-0.0666474	-0.0003851	0.0001789	-0.0000201	-0.0003851
118	0.1416345	-0.0666313	-0.0001912	0.0002551	-0.0000039	-0.0001912
119	0.2122112	-0.0666601	-0.0007671	0.0001422	-0.0000328	-0.0007671
120	0.2828825	-0.0666622	-0.0003087	0.0001239	-0.0000349	-0.0003087
121	0.3535275	-0.0666958	-0.0000976	0.0000793	-0.0000685	-0.0000976
122	0.4241629	-0.0667270	-0.0003516	0.0000249	-0.0000997	-0.0003516
123	0.4947865	-0.0667492	-0.0008348	-0.0000410	-0.0001219	-0.0008348
124	0.5653950	-0.0667585	-0.0009117	-0.0001222	-0.0001312	-0.0009117
125	0.6360287	-0.0667500	-0.0002832	-0.0001782	-0.0001227	-0.0002832
126	0.7066898	-0.0667597	-0.0003279	-0.0002067	-0.0001324	-0.0003279
127	0.7773407	-0.0667552	-0.0010078	-0.0002455	-0.0001279	-0.0010078
128	0.8479657	-0.0667907	-0.0001205	-0.0003102	-0.0001634	-0.0001205
129	0.9185646	-0.0668204	-0.0006376	-0.0004009	-0.0001931	-0.0006376
130	0.9892055	-0.0667859	0.0000269	-0.0004497	-0.0001585	0.0000269
131	-0.0000094	-0.1331387	0.0005146	-0.0000094	0.0001159	0.0005146
132	0.0707649	-0.1332085	-0.0007481	0.0000752	0.0000461	-0.0007481
133	0.1415451	-0.1332159	0.0000695	0.0001658	0.0000387	0.0000695
134	0.2828640	-0.1332548	0.0000537	0.0001054	-0.0000002	0.0000537
135	0.3535445	-0.1332999	0.0000535	0.0000962	-0.0000453	0.0000535
.						
.						
.						

Figura 22. Coordenadas ajustadas del panel.

Como resultado final de la calibración, el programa ofrece un fichero con los parámetros de orientación interna de la cámara, que será el que se utilice en el proceso de orientación de las fotografías.

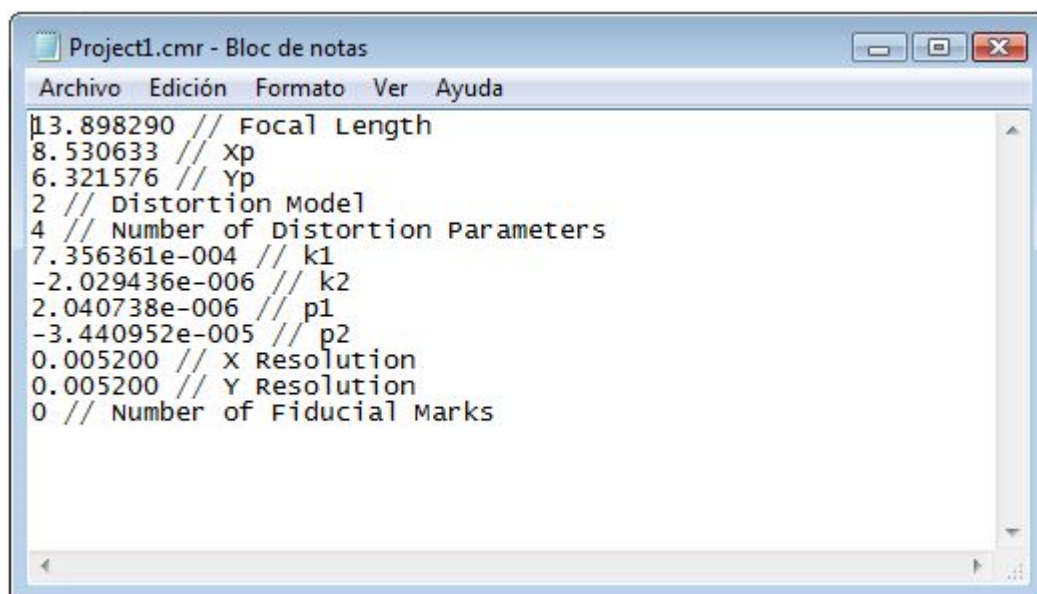


Figura 23. Fichero de resultados de la calibración.

El fichero contiene:

- Distancia focal calibrada
- Posición del punto principal de mejor simetría de la cámara
- Parámetros de distorsión (K_1 , K_2 distorsión radial y P_1 , P_2 distorsión tangencial)
- Resolución de la cámara

3.3. Observación, cálculo y ajuste de la red topográfica

En esta fase se pretende establecer una red topográfica que permita definir el sistema de referencia de coordenadas locales. Se trata de materializar en el terreno una serie de puntos configurando una geometría de intersecciones múltiples.

La toma de datos se realizó en las instalaciones del Museo Naval de Madrid, donde se encuentra la pieza objeto de nuestro trabajo. En concreto, se trataba de una habitación de unos 6 m x 5 m, donde había que organizar el espacio para trabajar de una forma cómoda y eficaz, ya que el equipo humano contó con cinco personas en este proceso. Se repartió el trabajo de manera que tres personas se encargarían de la toma de datos topográficos y dos de la toma fotográfica.

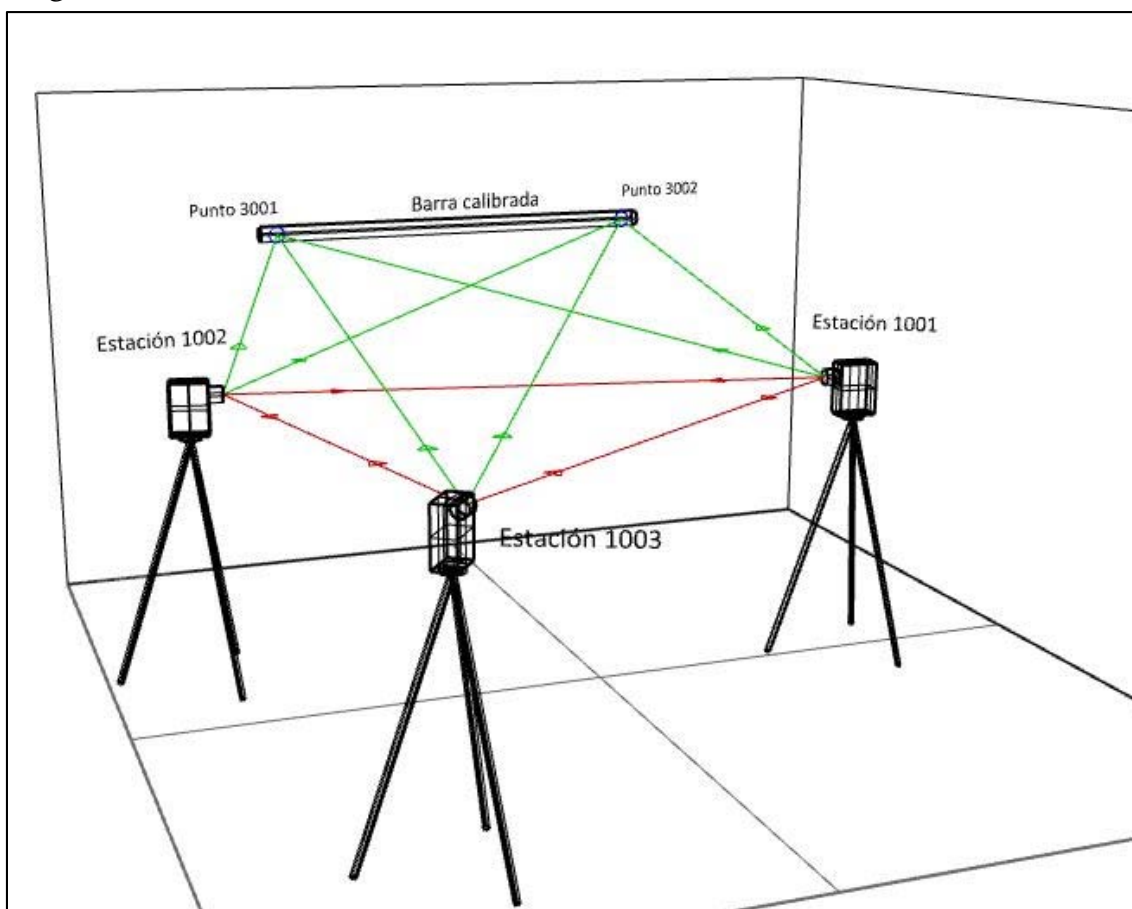


Figura 24. Red topográfica.

3.3.1. Observación de la red topográfica

Para la observación se utilizaron tres estaciones totales TC-1202 de Leica.



Datos técnicos generales

Aumentos del anteojo: 30 x

Precisión de estabilización del compensador: 0.2 mgon

Sensibilidad del nivel esférico: 6' / 2 mm

Resolución del nivel electrónico: 2"

Precisión en la medición de ángulos

- Tipo Desv. típ. Hz, V, ISO 17123-3: 0.6 mgon
- Unidad mínima visualizada: 0.1 mgon

Precisión referida a mediciones a prismas estándar: 1 mm + 1.5 ppm

Cada estación estaba controlada por un operador, se materializó la red haciendo una serie de observaciones angulares con visuales recíprocas y simultáneas entre cada estación, y para dar escala a la misma, se colocó una barra calibrada (medida conocida) la cual fue visada en sus dos extremos, angularmente, desde cada estación.

3.3.2. Cálculo de la red topográfica

Se trata de obtener las coordenadas (X, Y, Z) de las tres estaciones de la red para después poder dotar de coordenadas a los Puntos de Apoyo.

Estas coordenadas se obtendrán en un sistema de referencia local, cuyo origen, decidió establecerse en uno de los extremos de la barra calibrada. Para mayor comodidad en el cálculo, en el origen no se establecieron coordenadas (0, 0, 0), pues así evitaríamos obtener valores negativos en el resto de posiciones de la red, que resultan más incómodos para trabajar y son más complicados de interpretar gráficamente.

Por lo que se definió el origen de la siguiente forma:

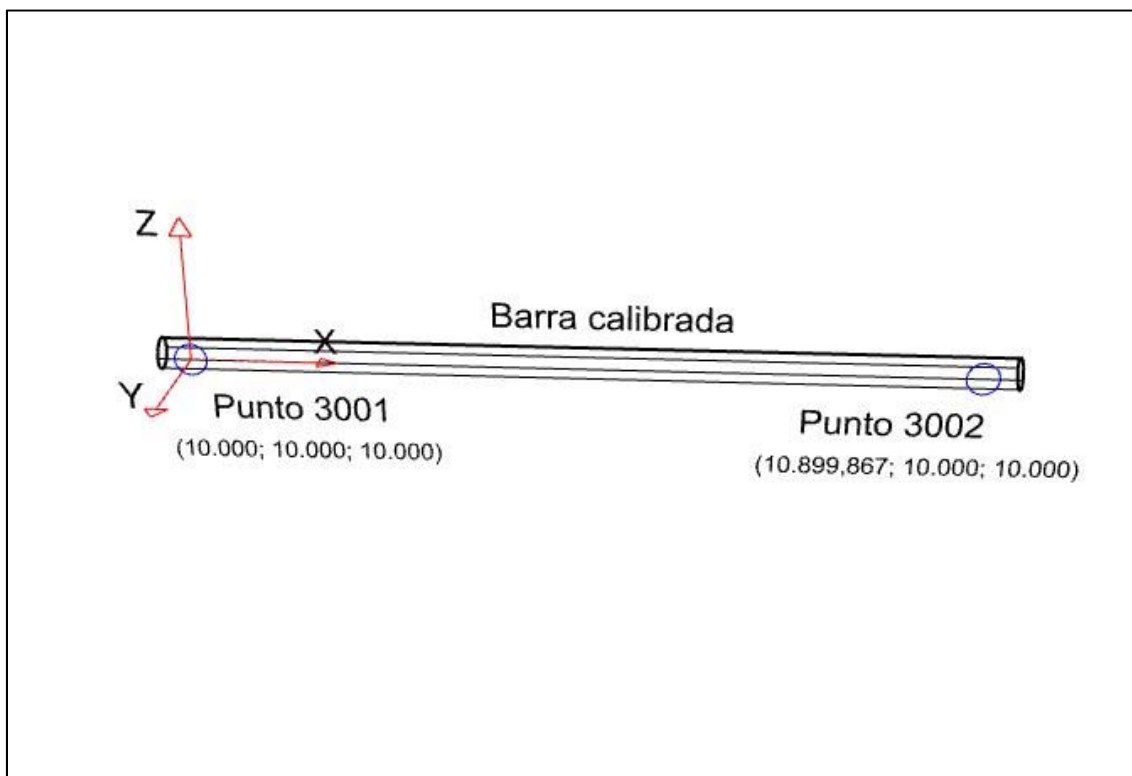


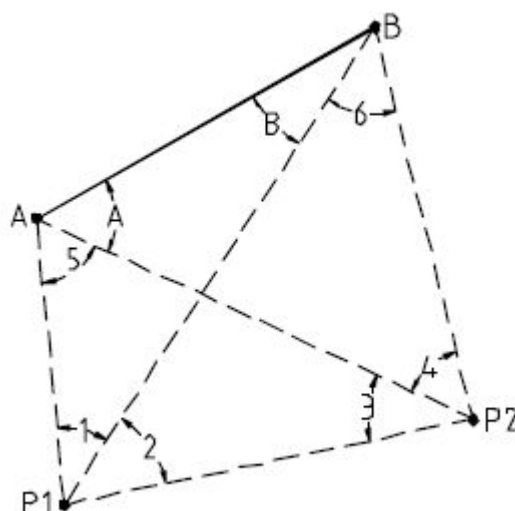
Figura 25. Posición del origen de la red.

Para el cálculo, se trabajó por separado la planimetría de la altimetría por mayor comodidad, pero en ambos casos se actuó del mismo modo:

Primero se calcularon unas coordenadas aproximadas de las estaciones para luego, mediante un ajuste por Mínimos Cuadrados obtener unas coordenadas ajustadas de cada estación (X, Y, Z) con sus correspondientes precisiones.

- **Planimetría.** se calcularon las coordenadas aproximadas de las bases 1001, 1002 y 1003 por el método de Hansen, utilizando la distancia conocida que se tiene de la barra calibrada (899,867 mm).

Este método consiste en obtener las coordenadas de dos puntos desconocidos, en los que hemos estacionado, a través de las observaciones hechas a dos puntos conocidos (los dos extremos de la barra calibrada)



$$X_{P_1} = X_A + AP_1 \times \sin \theta_A^{P_1}$$

$$X_{P_2} = X_B + BP_2 \times \sin \theta_B^{P_2}$$

$$Y_{P_1} = Y_A + AP_1 \times \cos \theta_A^{P_1}$$

$$Y_{P_2} = Y_B + BP_2 \times \cos \theta_B^{P_2}$$

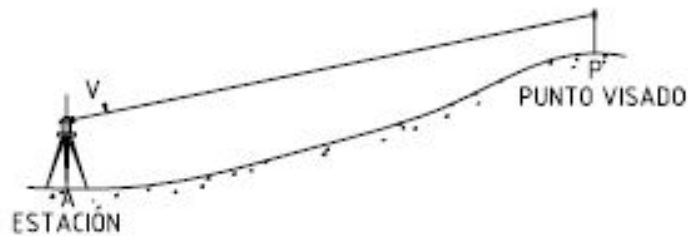
Después, estas coordenadas aproximadas se utilizaron para, con el resto de observaciones, hacer un ajuste por Mínimos Cuadrados de toda la red y obtener así las coordenadas finales de las bases con sus precisiones:

Punto	Coordenadas		Precisiones	
	X (mm)	Y (mm)	X (mm)	Y (mm)
1001	13926,621	8052,541	0,077	0,044
1002	8585,191	8921,076	0,029	0,044
1003	9110,238	6286,844	0,044	0,077

Como se puede observar en la tabla, las precisiones finales de todas las coordenadas de la red están por debajo de 0.1 mm, este valor es bastante bueno para conseguir tener una precisión final de 1mm.

- **Altimetría.** como se ha dicho, para la altimetría se actuó del mismo modo, calculando unas coordenadas aproximadas primero, pero en este caso estas coordenadas se obtuvieron a partir de los desniveles calculados con las observaciones realizadas.

$$H' = \frac{Dist}{\tan V}$$



Posteriormente estas coordenadas aproximadas se utilizaron para, con el resto de observaciones, realizar el ajuste por Mínimos Cuadrados, obteniendo así las coordenadas finales y precisiones.

Punto	H (mm)	Precisión (mm)
1001	9690,314	0,038
1002	9680,369	0,024
1003	9731,474	0,034

Al igual que las precisiones en planimetría, las precisiones en la coordenada Z de todos los puntos de la red está por debajo de 0.1 mm. Como se ha dicho anteriormente, con este valor conseguiremos llegar a la precisión final de 1mm.

3.4. Apoyo fotogramétrico

Desde las bases de la red topográfica se realizan observaciones múltiples a los puntos de apoyo, materializados alrededor de la pieza y perfectamente identificables en la imagen. Las coordenadas de estos puntos se calculan en el sistema de referencia implantado, para posteriormente utilizarlas en la determinación de la orientación externa del haz perspectivo.

3.4.1. Observación del apoyo fotogramétrico

El apoyo fotogramétrico de la pieza se basa en dotar de coordenadas en el sistema de referencia local a una serie de puntos perfectamente identificables en las imágenes. La materialización de estos puntos consistió en una serie de pirámides colocadas sobre unos listones de madera que forman una estructura que encierra la maqueta.

En fotogrametría, el apoyo se puede establecer en puntos del objeto, pero en este caso, debido a que no era posible tener ningún contacto con la pieza, se decidió establecer una red de apoyo

que rodeará la pieza en cuestión. Estos puntos medidos, estarán totalmente identificables en las fotografías.



Figura 26. Distribución de los puntos de apoyo.

Disponíamos de 7 puntos de apoyo en cada listón, esto es, 28 en total.

Estos puntos de apoyo se observaron haciendo una vuelta de horizonte en cada estación, este método permite posteriormente determinar coordenadas (X, Y, Z) desde un punto fijo, que en nuestro caso serán las bases de la red anteriormente explicada.

Para situar los puntos de apoyo, desde las bases se visaran las distintas direcciones a cada punto, primeramente se visaran todas las referencias en Circulo Directo (CD), para posteriormente, girando 200^s el instrumento y dando vuelta de campana al anteojo visar otra vez todas las referencias en Circulo Inverso (CI), esto se hace para poder detectar errores groseros en las observaciones, tomaremos en cada observación las lecturas angulares, esto es, el ángulo acimutal y cenital.

En cada punto de apoyo habrá que resolver la trisección que se plantea, pues tendremos tres observaciones (cada una desde una estación) para cada punto.

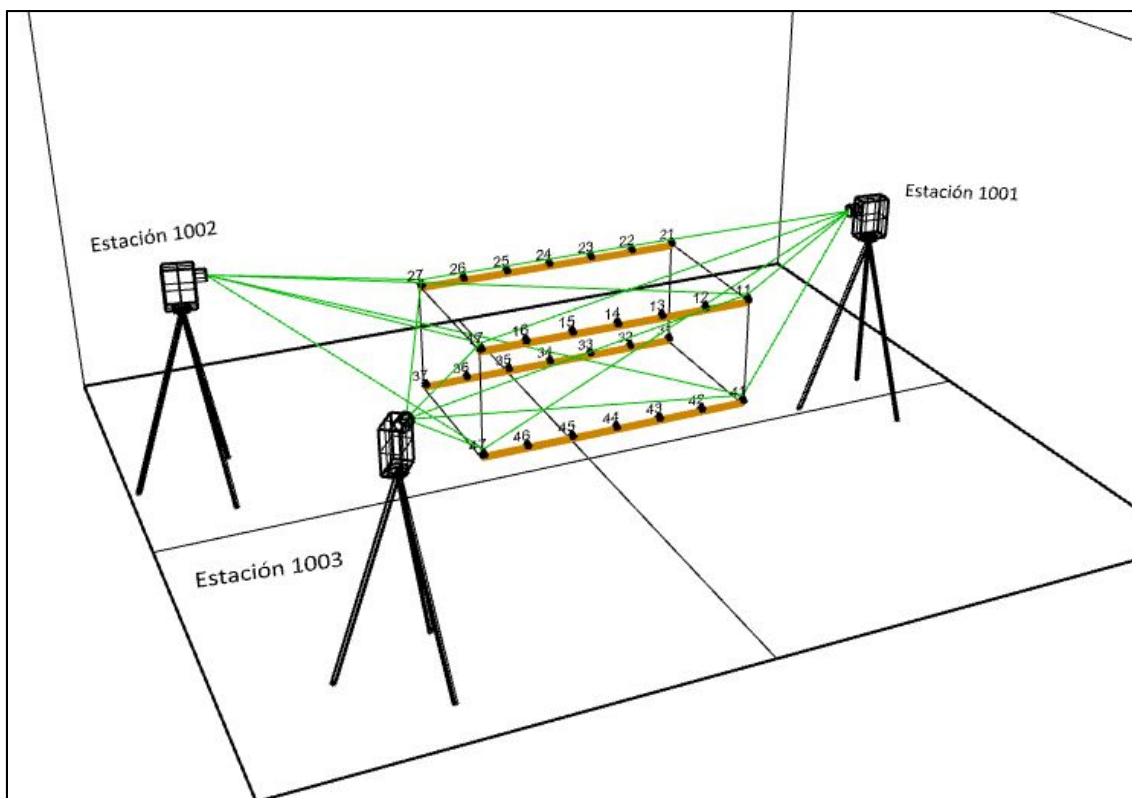


Figura 27. Observación de los puntos de apoyo.

3.4.2. Cálculo del apoyo fotogramétrico

El cálculo del apoyo fotogramétrico consiste en obtener las coordenadas de todos los puntos del apoyo en el sistema de referencia local establecido.

En total disponemos de 28 puntos de apoyo, distribuidos en cuatro listones de madera que formaban un cubo que encerraba la pieza. Cada listón disponía de 7 puntos de apoyo:

Listón 1 → 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17

Listón 2 → 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27

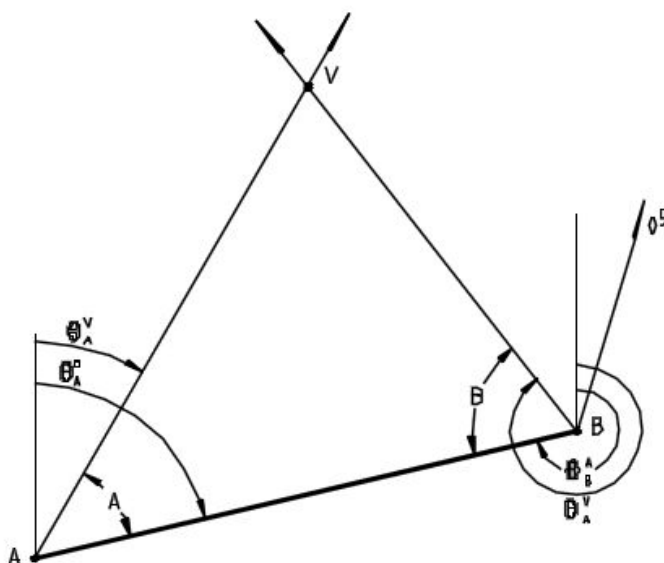
Listón 3 → 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37

Listón 4 → 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47



Al igual que en el cálculo de la red topográfica, se procedió al cálculo de la planimetría y altimetría por separado, por mayor comodidad.

- **Planimetría.** Primeramente, se calcularon unas coordenadas aproximadas de cada uno de estos puntos por Intersección Directa simple desde las bases 1001 y 1002. En la intersección directa simple tendremos como datos previos las coordenadas de dos vértices (1001 y 1002). Podremos conocer también la desorientación en estos puntos; con la desorientación calculamos los acimutes al punto problema desde los puntos de estación para poder obtener así las coordenadas.



$$X_V = (Y_V - Y_A) \tan \theta_A^V + X_A$$

$$Y_V = \frac{Y_B \tan \theta_B^V - Y_A \tan \theta_A^V + X_A - X_B}{\tan \theta_B^V - \tan \theta_A^V}$$



Después de calcular las coordenadas aproximadas para cada punto de apoyo, estas, pudieron ajustarse con el resto de observaciones mediante un ajuste Mínimo Cuadrático, obteniendo así las coordenadas finales con sus precisiones:

Punto	Coordenadas		Precisiones	
	X (mm)	Y (mm)	X (mm)	Y (mm)
11	12141,567	7818,768	0,185	0,048
12	11897,371	7775,719	0,162	0,049
13	11650,326	7730,091	0,141	0,050
14	11403,133	7685,348	0,121	0,050
15	11156,503	7641,905	0,104	0,050
16	10909,395	7598,358	0,088	0,049
17	10664,221	7557,647	0,074	0,048
21	12053,375	8300,576	0,155	0,044
22	11807,963	8259,166	0,144	0,046
23	11561,204	8215,586	0,130	0,048
24	11315,331	8172,038	0,115	0,049
25	11066,325	8127,895	0,100	0,049
26	10820,609	8085,616	0,085	0,048
27	10575,536	8039,967	0,072	0,047
31	12081,714	8276,152	1,782	0,244
32	11834,058	8250,231	0,987	0,134
33	11584,125	8223,013	0,682	0,103
34	11311,908	8190,582	0,115	0,049
35	11086,344	8160,991	0,101	0,049
36	10838,976	8128,534	0,087	0,048
37	10592,697	8095,016	0,074	0,047
41	12135,142	7783,886	0,336	0,086
42	11888,618	7751,174	0,301	0,089
43	11641,468	7719,087	0,269	0,093
44	11414,947	7688,834	0,122	0,050
45	11143,024	7662,131	0,103	0,050
46	10893,670	7634,092	0,087	0,049
47	10645,800	7607,516	0,073	0,048



- **Altimetría.** para el cálculo de la coordenada Z de los puntos de apoyo se procedió del mismo modo que en el cálculo de la altimetría de la red, se calculan coordenadas aproximadas a partir de desniveles medidos y estos se ajustan con todas las observaciones en una ajuste por Mínimos Cuadrados, la solución será las coordenadas finales con sus precisiones.

Punto	H (mm)	Precisión (mm)
11	9634,249	0,043
12	9626,792	0,046
13	9618,003	0,047
14	9614,787	0,047
15	9613,133	0,046
16	9613,666	0,044
17	9615,272	0,042
21	9623,607	0,045
22	9618,625	0,047
23	9616,245	0,048
24	9615,139	0,047
25	9615,061	0,046
26	9616,914	0,045
27	9621,402	0,042
31	9136,133	0,055
32	9139,844	0,053
33	9140,028	0,055
34	9144,126	0,047
35	9139,592	0,047
36	9140,323	0,045
37	9135,665	0,043
41	9141,150	0,047
42	9142,780	0,051
43	9139,605	0,054
44	9143,535	0,047
45	9138,518	0,046
46	9135,872	0,044
47	9129,806	0,042

Como se puede observar en las tablas de resultados, tanto en planimetría como en altimetría, todos los puntos de apoyo tienen una precisión que está por debajo de 0.2 mm, exceptuando los tres primeros puntos del listón 3, que llegan a tener una precisión de aproximadamente 1

mm, por lo que se tendrá especial cuidado con ellos a la hora de medirlos en las orientaciones de las fotografías.

3.5. Toma fotográfica

Se empezó por preparar la red fotogramétrica de forma que cubriese todo el volumen de la pieza, para ello, se marcaron en el suelo las pasadas que se tenían que hacer con la ayuda de una cinta, de manera que la pieza quedaba totalmente rodeada por las pasadas.



Figura 28. Distribución de las pasadas.

A continuación se realizaron las fotografías necesarias en cada pasada con los parámetros obtenidos en el proyecto de toma y que están detallados en el punto “3.1. Proyecto de toma fotográfica” de esta memoria.

Para una mejor calidad de las imágenes, pues serán un gran condicionante en el trabajo, se dispusieron una serie de focos de iluminación. Además, para evitar cualquier movimiento de la cámara en el momento del disparo, se realizaron las fotografías desde un ordenador portátil, así también podíamos ir comprobando como iban saliendo las tomas.



La geometría de la red fotogramétrica quedo de la siguiente forma:

Se realizaron 9 pasadas normales a la pieza, de las cuales:

- 8 se realizaron para cubrir la pieza desde vistas frontales y oblicuas a la misma. En total se hicieron 28 fotografías en estas 8 pasadas
- Una se realizó para cubrir la planta de la misma. Esta pasada se realizó con 5 fotografías.



Figura 29. Toma frontal.



Figura 30. Toma de planta.

Por otro lado, se realizaron una serie de tomas convergentes, con esto resolvíamos la incertidumbre en ciertas zonas de la pieza que tenían difícil acceso desde las tomas normales. Estas tomas también se realizaron desde dos puntos de vista distintos:

- Vista convergente desde arriba: se realizaron 7 fotografías
- Vista convergente desde abajo: se realizaron 17 fotografías

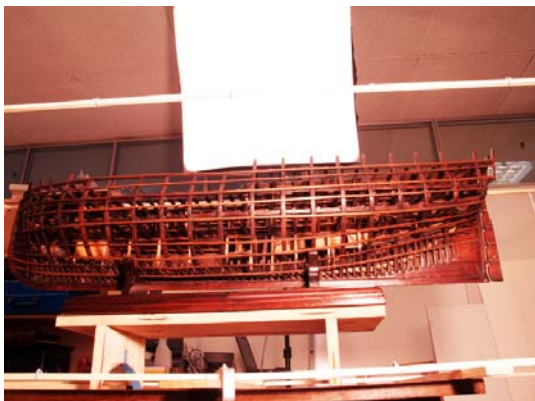


Figura 31. Toma convergente. (Abajo)

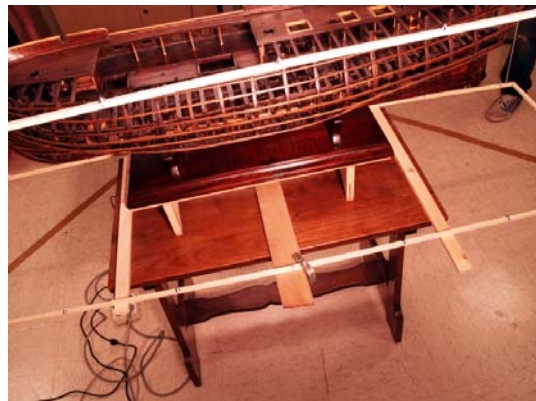


Figura 32. Toma convergente. (Arriba)

Resumiendo, teníamos la siguiente distribución de pasadas y tomas:

	Vista	Pasada	Nº de fotogramas
Pasadas Normales	Frontales	1	5
		2	3
		3	3
		4	3
		5	5
		6	3
		7	3
		8	3
	Planta	9	5
	Convergente (arriba)	*	7
	Convergente (abajo)	*	17

* Las tomas convergentes no se distribuyen por pasadas, simplemente son una serie de fotografías que sirven como apoyo y relleno de las pasadas normales.

También se puede observar la distribución gráficamente:

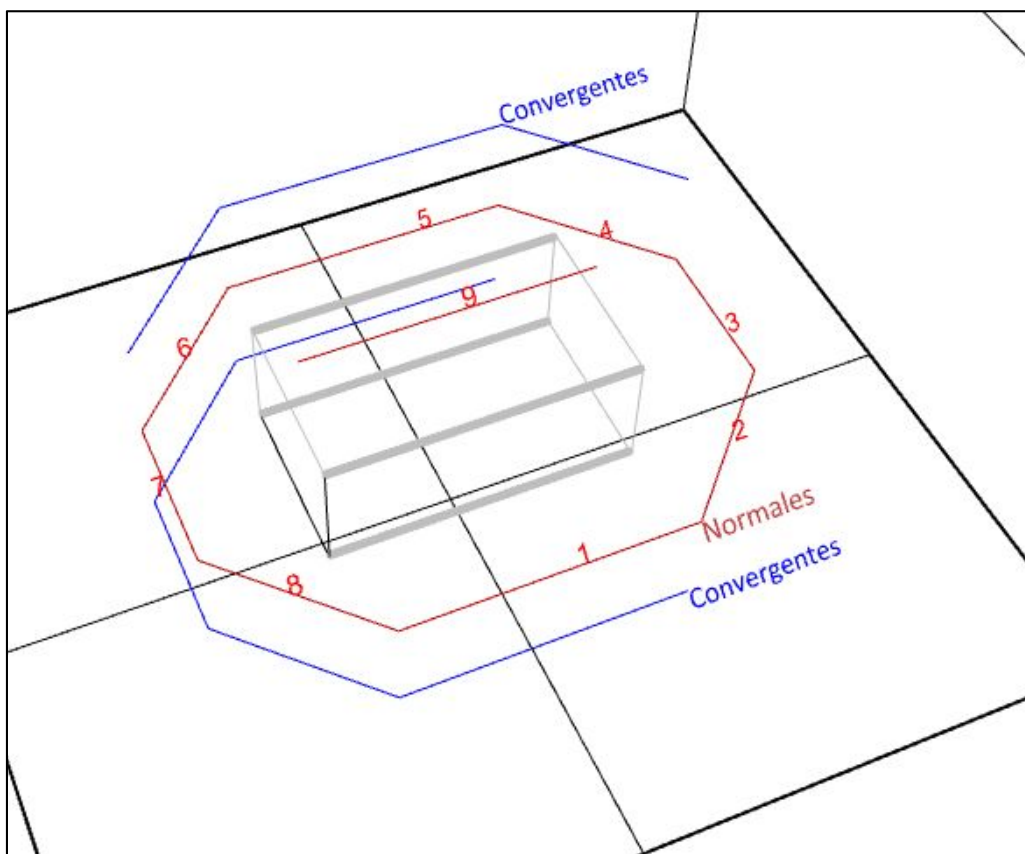


Figura 33. Distribución de las pasadas.

3.6. Orientación fotogramétrica

Con el proceso de orientaciones en fotogrametría, se pretende calcular la posición exacta de la geometría de la toma fotográfica para poder realizar observaciones sobre esta.

Con la Orientación Interna conseguiremos conocer con precisión la posición del punto principal de la cámara, para después, con la Orientación Externa, conocer la posición y orientación de la cámara en el momento de la toma.

3.6.1. Orientación Interna

La Orientación Interna se basa en conocer la geometría del haz perspectivo, esto es, conocer la posición del punto principal de la cámara con respecto a un sistema de coordenadas (fotocoordenadas).

Esta geometría viene determinada por los parámetros de orientación interna, que son los parámetros de orientación de la cámara fotográfica.

Estos parámetros son los calculados en el proceso de calibración de la cámara (apartado 3.3. Calibración geométrica de la cámara fotográfica” de esta memoria). Se utilizarán estos parámetros para transformar las coordenadas pixel de la imagen en fotocoordenadas.

3.6.2. Orientación Externa

3.6.2.1. Introducción

Con la Orientación Externa se establece la relación entre el sistema bidimensional imagen (fotocoordenadas) con el sistema tridimensional objeto (coordenadas locales).

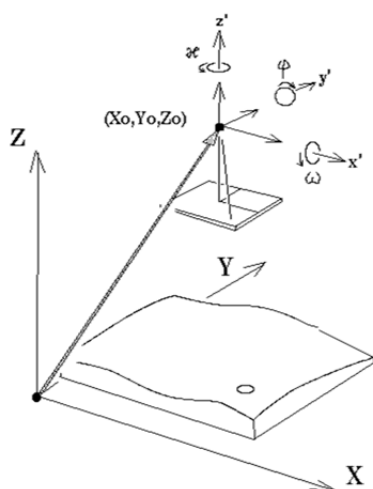


Figura 34. Orientación externa.



Sabemos que una manera de lograr una buena reconstrucción tridimensional de un objeto en el espacio es mediante el empleo de dos fotografías del objeto tomadas desde puntos de vista diferentes (estéreo fotogrametría). Se trata entonces de un problema de intersección en el espacio donde cada punto del objeto está determinado por un par de rayos que salen desde los centros de proyección y se cortan en dicho punto.

Con la orientación interna de un fotograma conseguimos conocer perfectamente la posición del centro de proyección con respecto a un sistema de coordenadas (fotocoordenadas), pero para poder reconstruir un objeto situado en el espacio a partir de su perspectiva fotográfica también se necesita conocer la posición de ese fotograma en el espacio, esto es la Orientación Externa (define la posición y la orientación angular asociada con una imagen). Los elementos de orientación externa serán entonces, los que definan la posición y orientación de cada imagen en el momento de la toma ($x_0, y_0, z_0, \omega, \varphi, \kappa$).

3.6.2.2. Proceso de orientaciones

Como se mencionó en el aparatado de calibración de la cámara, el proceso de fotogrametría se ha realizado con el software “Image Master” de TOPCON, que además del módulo de calibración, también tiene otros módulos como el de orientaciones, que es la siguiente fase de este proyecto.

Para llevar a cabo este proceso se creó un nuevo proyecto en el programa que había que adaptar a nuestro trabajo, por lo que lo primero fue definir el sistema de coordenadas del trabajo y las unidades con las que íbamos a trabajar (mm). A continuación se introdujeron una serie de ficheros necesarios para el trabajo, que son:

- El fichero de resultados de la calibración de la cámara (fichero .cmr) que se explicó anteriormente
- El fichero con las coordenadas calculadas de los puntos de apoyo

Después, se introdujeron en el programa las tomas de la red fotográfica, organizadas por pasadas (como se mostró en la figura 33 del apartado “3.5 Toma fotográfica”), y dentro de las pasadas, se formaron pares fotogramétricos para ir realizando la orientación de cada uno de ellos.

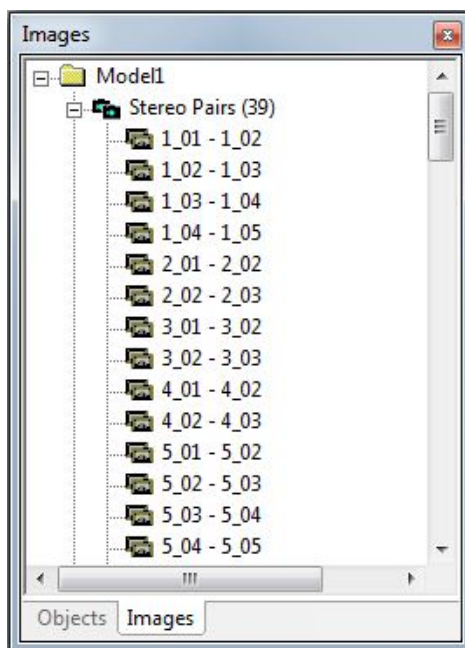


Figura 35. Pares estereoscópicos. Image Master.

Empezamos por abrir el primer par fotogramétrico (1_01 – 1_02) y medir los puntos necesarios sobre él (puntos bien definidos).

En total mediremos 12 puntos, de los cuales, 9 serán puntos de enlace medidos sobre la superficie de la pieza, realizándose el solape en cada par estereoscópico con 6 puntos (necesarios para determinar todas las incógnitas, x_0 , y_0 , z_0 , ω , ϕ , κ).

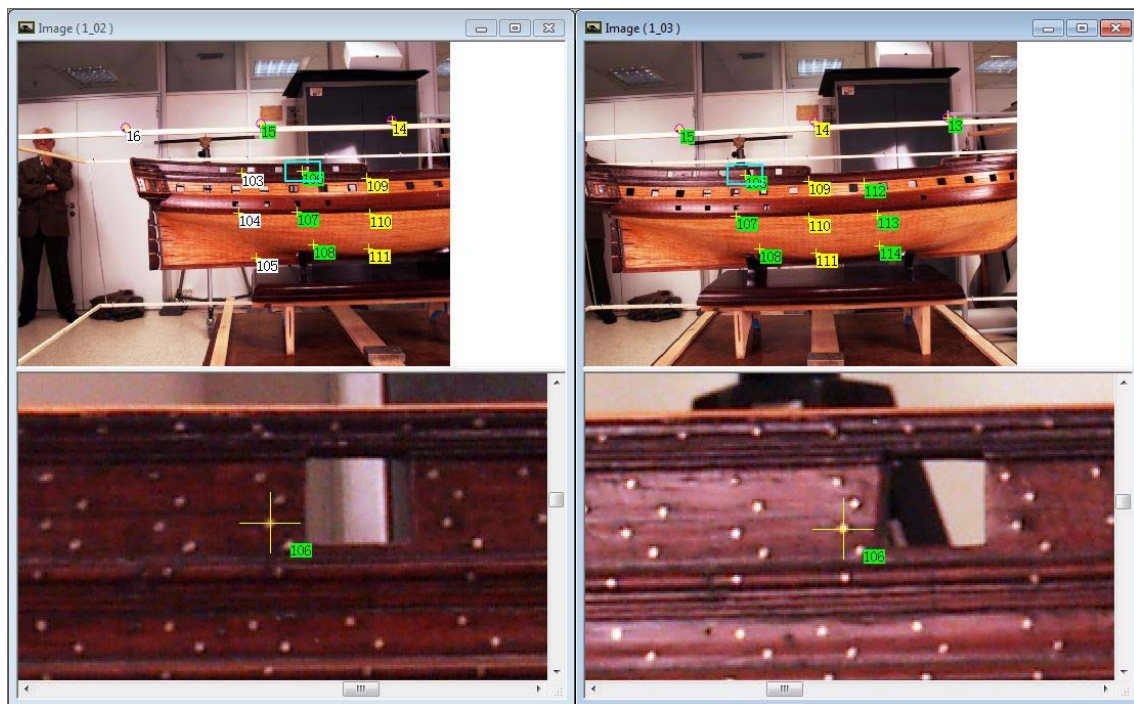


Figura 36. Puntos de enlace. Image Master.

También mediremos en el primer par los Puntos de Apoyo (3 puntos por cada par fotogramétrico), de los cuales tenemos sus coordenadas calculadas anteriormente y las hemos introducido en el programa, por lo que los mediremos y les asignaremos el mismo nombre que tienen en el fichero de coordenadas para que el programa los reconozca. Con la medición de estos puntos conseguiremos dar escala al modelo y obtener coordenadas terreno de las mediciones.

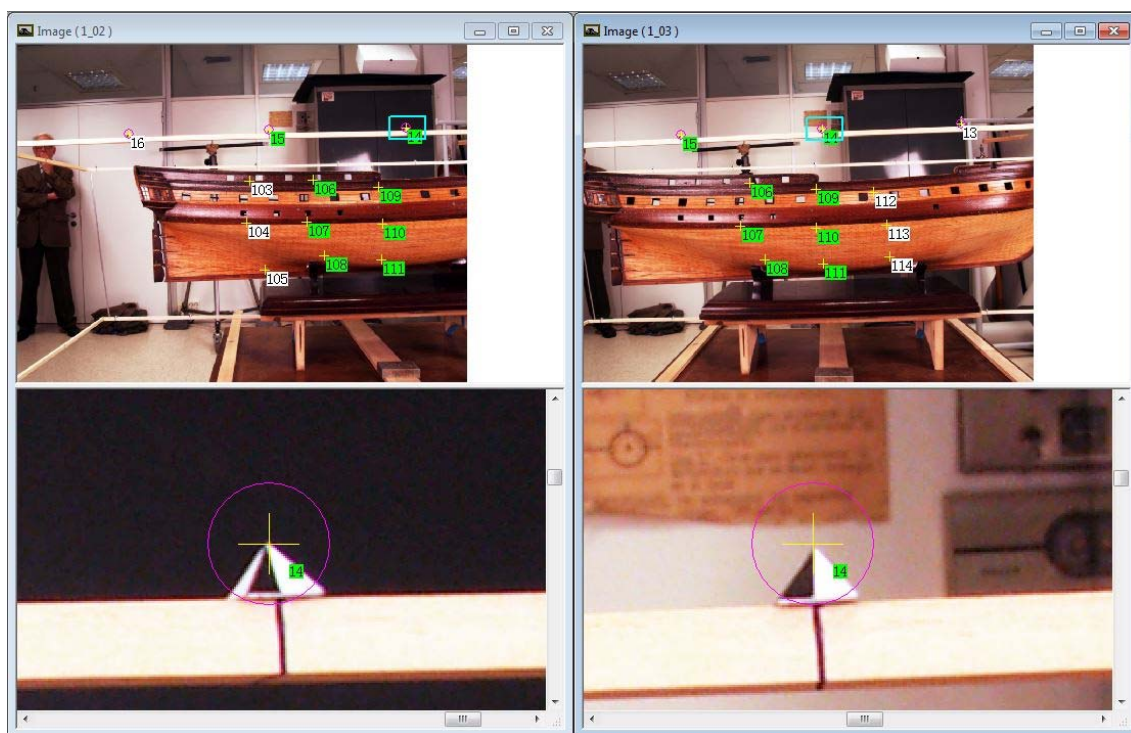


Figura 37. Puntos de apoyo. Image Master.



Una vez medidos estos 12 puntos, tenemos que el solape en cada se realiza con 8 puntos (6 puntos de enlace y 2 puntos de apoyo).

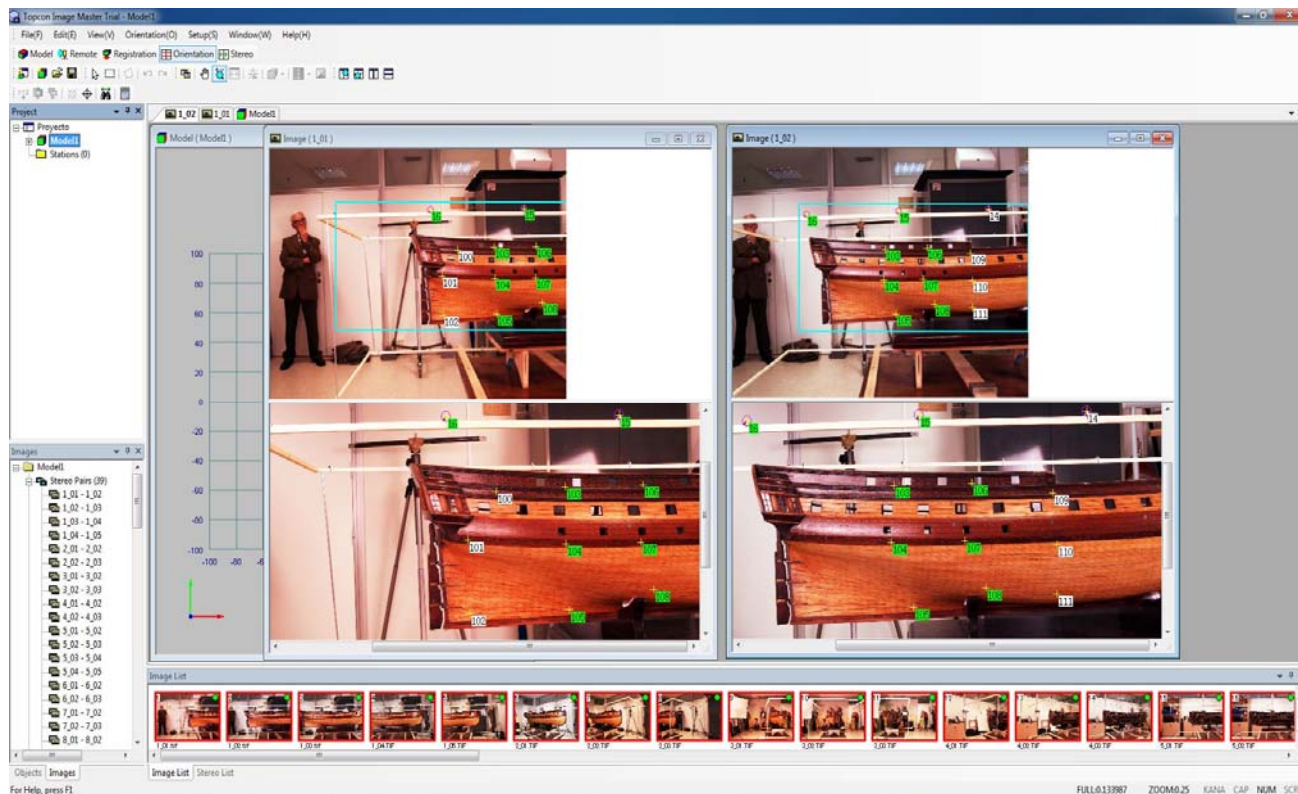


Figura 38. Medida de un par estereoscópico.

Continuaremos con este proceso con todas las pasadas hasta llegar al último par, que debe enlazar con el primero.

3.6.2.3. Resultados

Como resultado de toda esta operación, conseguiremos un fichero de orientación externa en el que tendremos:



- o Las coordenadas y desviaciones de estas de los puntos medidos en cada imagen, en el sistema de medida de la imagen (pixel) y en el sistema de referencia local (milímetros):

[Image Coordinates]					
Image 1					
Image Name		1_01			
Image Coordinates and Residuals [pixel]					
PointName	x[pixel]	y[pixel]	dx[pixel]	dy[pixel]	
16	1762.50	592.63	-0.02	-0.13	
15	2789.88	583.88	0.21	0.46	
100	2058.50	989.53			
101	1893.00	1243.56			
102	1905.50	1632.47	0.24	0.13	
104	2471.50	1265.53	-0.33	-0.38	
108	2991.47	1504.00	-0.35	-0.15	
106	2927.00	952.98	-0.11	0.23	
103	2466.30	963.02	0.31	-0.07	
105	2490.63	1613.70	0.25	-0.05	
107	2914.02	1257.44	-0.18	-0.10	
RMS [pixel]		0.34			
Number of Image Coordinates		11			
Photo Coordinates and Residuals [mm]					
PointName	x[mm]	y[mm]	dx[mm]	dy[mm]	
16	0.639183	3.264007	-0.000082	-0.000656	
15	6.153903	3.381131	0.001099	0.002388	
100	2.183024	1.180920			
101	1.314668	-0.145183			
102	1.384758	-2.178155	0.001253	0.000685	
104	4.377849	-0.263222	-0.001697	-0.001989	
108	7.254738	-1.550004	-0.001832	-0.000782	
106	6.889333	1.405209	-0.000596	0.001190	
103	4.354013	1.331489	0.001627	-0.000344	
105	4.493789	-2.104707	0.001287	-0.000268	
107	6.810606	-0.224794	-0.000912	-0.000514	
RMS [mm]		0.001750			
Number of Photo Coordinates		11			

Figura 39. Coordenadas medidas.

Las coordenadas finales, después de hacer un promedio con las medidas en cada una de las imágenes de todos los puntos medidos, incluidos los puntos de apoyo, de los que además tendremos los residuos, pues ya teníamos unas coordenadas de estos.

[Calculated Coordinates]							
Calculated Coordinates and Residuals							
PointName	x[mm]	y[mm]	z[mm]	dx[mm]	dy[mm]	dz[mm]	
16	10909.3868	7598.3563	9613.6595	-0.0082	-0.0017	-0.0065	
15	11156.4862	7641.8782	9613.1977	-0.0168	-0.0268	0.0647	
102	10920.3598	7852.4783	9326.5573				
104	11091.9304	7758.8121	9446.1997				
108	11252.8091	7806.7375	9369.0870				
106	11231.6715	7788.4457	9533.9885				
103	11096.0334	7781.8463	9534.9380				
105	11113.5997	7879.0005	9326.8359				
107	11217.3287	7761.6242	9445.2841				
111	11378.0747	7818.7176	9356.9468				
109	11370.9396	7795.9576	9514.6587				
14	11403.1020	7685.3472	9614.7845	-0.0310	-0.0008	-0.0025	
110	11371.7386	7775.3968	9436.1349				
114	11517.9626	7834.5680	9367.4366				
13	11650.4030	7730.1614	9617.9934	0.0770	0.0704	-0.0096	
112	11488.2979	7807.7735	9505.1428				
113	11513.2184	7796.4125	9437.6423				
12	11897.3327	7775.6918	9626.7907	-0.0383	-0.0272	-0.0013	
116	11626.4903	7817.6336	9437.9057				
117	11643.1778	7856.6700	9385.2115				
115	11646.5366	7828.3524	9499.1168				
120	11727.9422	7965.2728	9336.7538				
119	11785.5465	7871.3212	9448.7789				
118	11773.0240	7869.6597	9519.9490				
123	11825.6723	7970.3133	9373.3553				
121	11868.4234	7922.2863	9543.8082				
122	11847.6789	7916.0916	9469.1519				
125	11872.4845	7954.3244	9456.5761				
126	11867.9215	7973.9411	9408.3532				
01	11710.6137	7919.6035	9243.7511				
02	11614.5958	8015.0645	9161.1038				
124	11873.4937	7947.5941	9509.7689				
127	11892.8446	7983.2701	9532.8545				
128	11896.5140	7985.8734	9471.8001				
129	11880.6115	7974.8165	9428.9567				
130	11866.5598	8022.8963	9532.6441				
131	11862.1532	8029.2090	9501.0860				
132	11882.3924	8005.6086	9446.7276				

Figura 40. Promedio de coordenadas.



- Las posiciones de la cámara en cada una de las imágenes, esto es, las coordenadas X, Y, Z de la posición de la cámara y los ángulos de rotación de la misma (ω , ϕ , κ)

[Camera Locations]						
Camera Positions and Angles						
ImageName	Xo[mm]	Yo[mm]	Zo[mm]	omega[deg]	Phi[deg]	kappa[deg]
1_01	10976.4379	6972.8848	9468.4630	-89.865	-1.497	-9.097
1_02	11219.9482	6993.1739	9469.9985	-89.817	-1.488	-9.933
1_03	11485.9048	7045.7536	9468.3000	-89.917	-1.973	-9.690
1_04	11734.3941	7064.3457	9471.2110	-89.744	-2.003	-9.813
1_05	11958.0478	7114.8941	9467.0675	-90.081	-1.644	-8.515
2_01	12299.1390	7286.8998	9470.1076	-89.547	-1.233	-49.568
2_02	12450.2871	7495.0568	9474.4001	-89.360	-1.242	-51.072
2_03	12594.8903	7645.3696	9476.9123	-89.121	-1.179	-48.242
3_01	12620.0580	7841.7008	9478.4094	-89.031	-0.958	-100.115
3_02	12575.8712	8101.1743	9476.6518	-89.422	-0.806	-99.024
3_03	12522.0498	8328.0914	9476.5574	-88.896	-0.605	-98.819
4_01	12391.0930	8533.4278	9468.7769	-89.798	-1.380	-150.114
4_02	12257.6508	8696.7835	9470.4681	-89.493	-1.231	-154.374
4_03	12001.2098	8803.9712	9470.1861	-89.616	-1.166	-155.155
5_01	11736.6931	8894.4730	9464.6475	-89.981	-1.118	171.665
5_02	11513.0429	8861.1662	9463.9636	-89.973	-0.631	170.635
5_03	11248.1489	8815.5649	9464.5143	-90.370	-0.447	171.019
5_04	10990.7773	8793.1352	9464.3571	-89.923	-1.107	170.842
5_05	10788.3616	8758.7424	9462.7934	-90.004	-1.142	170.783
6_01	10304.8073	8538.1190	9456.2928	-90.006	-0.544	128.534
6_02	10167.0039	8361.9050	9461.2457	-89.823	-0.612	128.201
6_03	10012.3264	8171.7839	9466.6324	-89.252	-0.606	128.376
7_01	10029.8718	8015.7061	9469.2483	-88.798	-1.171	80.171
7_02	10093.2053	7726.9001	9471.8675	-88.549	-1.157	79.128
7_03	10116.9529	7506.1121	9469.0938	-88.626	-0.801	80.893
8_01	10275.0886	7242.0929	9466.5371	-89.860	-0.984	36.514
8_02	10444.0152	7110.6137	9469.3692	-89.866	-0.765	35.858
8_03	10692.1869	6939.0972	9468.9777	-90.025	-0.742	35.771
9_01	11766.4722	7992.6993	10326.6531	1.013	0.834	170.113
9_03	11320.9986	7949.9181	10428.4082	2.093	1.116	174.312
9_05	10831.3384	7871.6298	10388.7788	4.295	1.184	173.386
10_01	11984.0743	8781.5652	9922.9713	-42.096	-6.378	-162.270
10_02	11667.7925	8790.0360	9923.2897	-42.034	-6.161	-176.021
11_01	11314.4333	8724.7556	9920.9345	-42.020	-5.935	-176.874
11_02	10996.4341	8703.1975	9920.5201	-42.135	-6.052	174.244
11_03	10699.2614	8657.2050	9920.5028	-42.095	-5.903	170.439
12_01	10476.4199	8526.4331	9921.6914	-41.817	-5.681	150.518
12_02	10292.1695	8279.5405	9919.5360	-41.574	-5.605	131.402
13_01	11694.2195	8874.5786	9110.2647	67.157	-178.529	-5.265
13_02	11384.5483	8831.5693	9110.4966	66.977	-179.013	-11.454
13_03	11112.1210	8782.0564	9109.0423	66.615	-178.594	-12.711
13_04	10837.4843	8742.4000	9108.4431	67.072	-178.256	-19.970
13_05	10610.9363	8701.4331	9105.5429	66.901	-178.462	-33.288

Figura 41. Posiciones de la cámara.

- La información relativa a cada par estereoscópico formado, esto es, la rotación de cada imagen en el par estereoscópico y el paralaje obtenido con su residual.

[Stereo Image Conditions]			
Number of Pairs 39			
Pair 1			
Pair Name	1_01 - 1_02		
Relative Rotation Angles			
	Omega[deg]	Phi[deg]	Kappa[deg]
Left	0.135	4.574	-1.698
Right	0.132	5.389	-1.654
Y-Parallax of Tie Points			
PointName	y-prx[pixel]	y-prx[mm]	
16	0.02	0.000120	
15	-0.02	-0.000101	
104	-0.04	-0.000186	
108	-0.07	-0.000373	
106	0.04	0.000228	
103	-0.07	-0.000355	
105	0.05	0.000236	
107	0.08	0.000431	
RMS [pixel]	0.09		
RMS [mm]	0.000454		
Number of Tie Points		8	

Figura 42. Parámetros del par estereoscópico.



- Por último tendremos los resultados de la formación de los pares estereoscópicos, donde se especifica la longitud de la base de cada par y la distancia entre el par estereoscópico y el objeto (alejamiento). Además de la precisión obtenida planimétrica y altimétrica.

Stereo Camera Conditions and Ground Resolution						
PairName	BaseLength[mm]	Height[mm]	B/H Ratio	PlaneRes[mm]	DepthRes[mm]	
1_01 - 1_02	244.3589	795.0857	0.31	0.2975	0.9679	
1_02 - 1_03	271.1096	770.1878	0.35	0.2882	0.8186	
1_03 - 1_04	249.2009	735.3020	0.34	0.2751	0.8118	
1_04 - 1_05	229.3323	750.0133	0.31	0.2806	0.9177	
2_01 - 2_02	257.2810	775.5963	0.33	0.2902	0.8748	
2_02 - 2_03	208.5913	790.6829	0.26	0.2958	1.1214	
3_01 - 3_02	263.2149	810.8694	0.32	0.3034	0.9346	
3_02 - 3_03	233.2126	800.4696	0.29	0.2995	1.0280	
4_01 - 4_02	210.9377	854.6616	0.25	0.3198	1.2956	
4_02 - 4_03	277.9411	861.6231	0.32	0.3224	0.9994	
5_01 - 5_02	226.1177	827.0066	0.27	0.3094	1.1317	
5_02 - 5_03	268.7910	774.9817	0.35	0.2900	0.8360	
5_03 - 5_04	258.3472	768.2169	0.34	0.2874	0.8547	
5_04 - 5_05	205.3227	778.1771	0.26	0.2912	1.1035	
6_01 - 6_02	223.7536	843.5195	0.27	0.3156	1.1898	
6_02 - 6_03	245.1534	943.3709	0.26	0.3530	1.3582	
7_01 - 7_02	295.6805	924.1061	0.32	0.3458	1.0806	
7_02 - 7_03	222.0787	834.1752	0.27	0.3121	1.1723	
8_01 - 8_02	214.0818	803.2458	0.27	0.3005	1.1276	
8_02 - 8_03	301.6741	916.7756	0.33	0.3430	1.0424	
9_03 - 9_05	497.4602	904.5207	0.55	0.3384	0.6153	
10_01 - 10_02	316.3953	885.0624	0.36	0.3311	0.9263	
11_01 - 11_02	318.7293	809.8417	0.39	0.3030	0.7699	
11_02 - 11_03	300.7108	820.4573	0.37	0.3070	0.8375	
12_01 - 12_02	308.0728	861.9711	0.36	0.3225	0.9023	
13_01 - 13_02	312.6438	813.2188	0.38	0.3043	0.7914	
13_02 - 13_03	276.8940	785.0162	0.35	0.2937	0.8327	
13_03 - 13_04	277.4856	811.5267	0.34	0.3036	0.8880	
13_04 - 13_05	230.2406	837.7925	0.27	0.3135	1.1406	
14_01 - 14_02	257.9373	833.6822	0.31	0.3119	1.0082	
14_02 - 14_03	259.4868	812.8633	0.32	0.3041	0.9527	
15_01 - 15_02	241.1768	860.6391	0.28	0.3220	1.1491	
16_01 - 16_02	269.1834	853.9514	0.32	0.3195	1.0136	
16_02 - 16_03	287.9602	802.1508	0.36	0.3001	0.8360	
17_01 - 17_02	268.1257	875.8257	0.31	0.3277	1.0704	
17_02 - 17_03	340.4134	861.6282	0.40	0.3224	0.8160	
17_03 - 17_04	402.3793	852.1629	0.47	0.3188	0.6752	
9_01 - 9_02	204.2644	774.6066	0.26	0.2898	1.0990	
9_02 - 9_03	258.8696	841.9941	0.31	0.3150	1.0247	

Figura 43. Precisión y posición del par estereoscópico.

Como se puede observar analizando los resultados expuestos anteriormente, se obtiene como precisión final de las orientaciones:

- Precisión planimétrica = 0,5 mm
- Precisión altimétrica = 1 mm

Una vez concluido esta fase, el trabajo estará listo para empezar con la restitución.

Los resultados que se muestran en las figuras de este apartado se expondrán completos en los anexos del proyecto.

3.7. Restitución

3.7.1. Introducción

La restitución permite determinar la posición de las intersecciones de los rayos homólogos de dos haces perspectivos, reconstruidos a partir de dos fotografías que forman un par fotogramétrico.

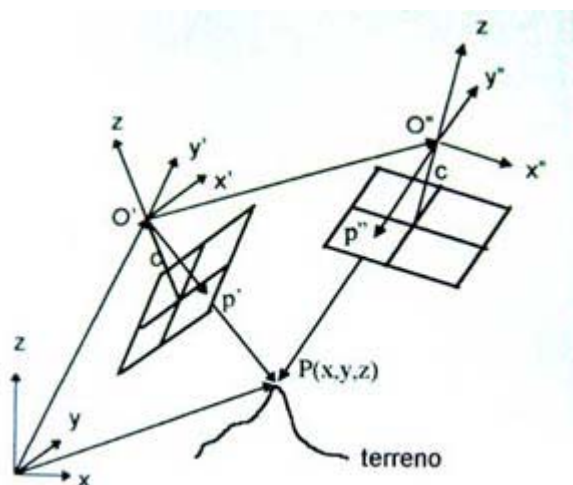


Figura 44. Restitución.

Para la restitución es imprescindible un sistema de visión estereoscópica, este sistema se basa en que al observar dos imágenes de la misma escena, tomadas desde dos puntos de vista diferentes, se puede obtener una impresión tridimensional del objeto observado, formándose lo que llamamos el modelo estereoscópico.

Para una observación estereoscópica correcta, se deben de cumplir las siguientes condiciones:

Cada ojo debe observar la imagen que le corresponde; o sea, el ojo izquierdo debe observar la escena izquierda, y lo mismo debe ocurrir con la del derecho. El resultado será la observación espacial tridimensional con efecto estereoscópico.

Las imágenes se deben colocar, para una correcta observación, de manera que los puntos homólogos, estén sobre la misma recta, es decir, las imágenes de los puntos correspondientes, deben estar situadas sobre paralelas a la base estereoscópica, no debiendo existir paralaje vertical en la observación.



3.7.2. Proceso de restitución

Esta fase también se ha realizado con el mismo software que las anteriores, ya que este programa tiene un módulo para la restitución.

El sistema de visión estereoscópica elegido para la restitución fue el sistema de polarización con gafas activas, esto es, las dos imágenes aparecen en la pantalla con distinta polarización y con la ayuda de las gafas percibiremos una imagen con cada ojo consiguiendo así el efecto estereoscópico que a su vez, consigue el efecto de profundidad de la imagen.

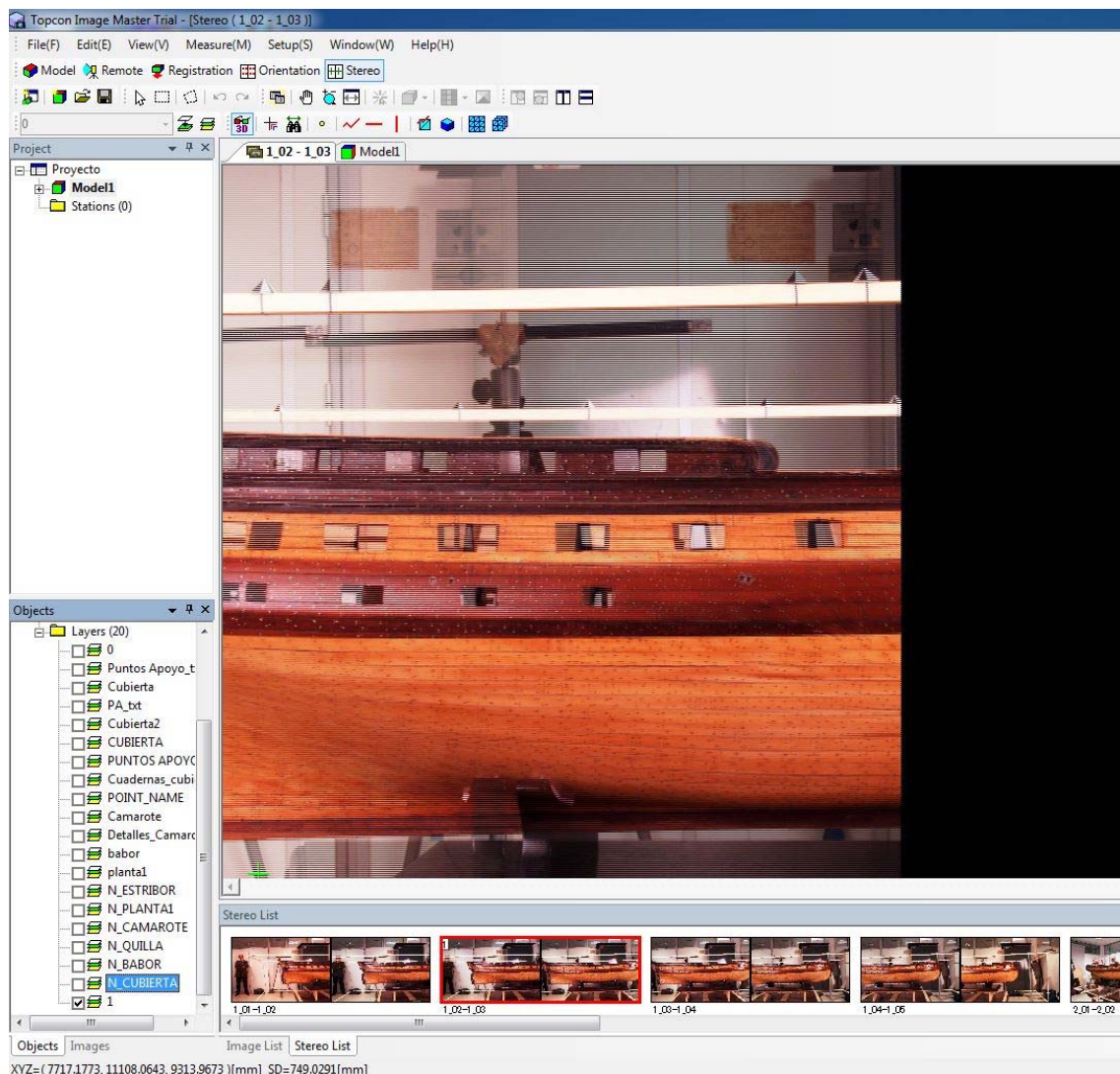


Figura 45. Visión estereoscópica. Image Master.



Como los pares estereoscópicos están formados después de todo el proceso de orientación externa, podemos empezar a restituir, esto es, empezaremos a medir las líneas que consideremos oportunas e incluso los puntos que necesitemos, posándonos en el objeto y dibujando sobre él.

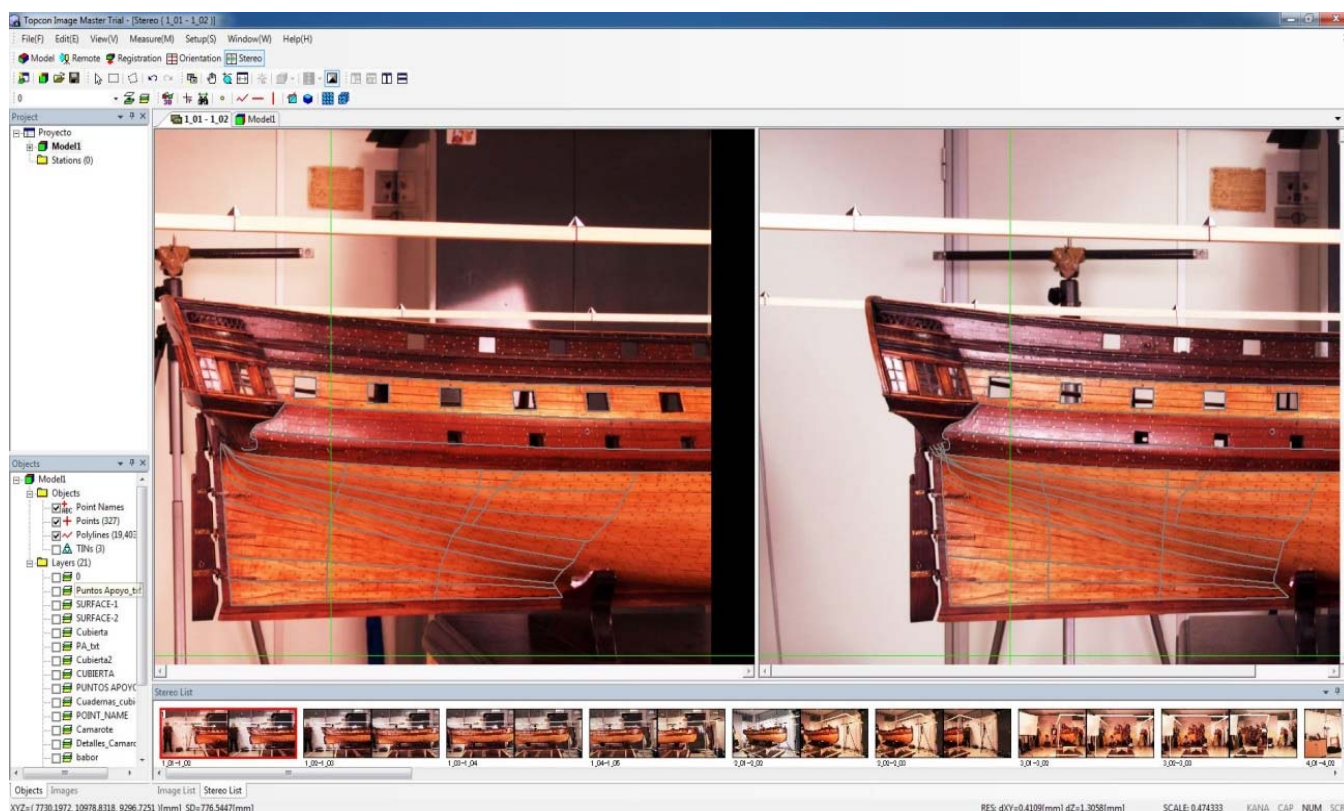


Figura 46. Proceso de restitución. Image Master.

Siguiendo esta técnica restituiremos todas las líneas y puntos que necesitemos en los distintos pares estereoscópicos formados hasta conseguir una base del modelo que luego podamos modelar y texturizar.

3.8. Modelado Tridimensional

La última fase del trabajo es el modelado tridimensional de la pieza.

Tenemos una serie de líneas del modelo que hemos restituido, así que decidimos tratarlas con un programa de modelado para suavizarlas y dibujar las superficies.

El programa elegido fue Rhinoceros, se trata de un software de modelado y diseño 3D. Permite la creación de modelos a partir de un conjunto de líneas, con las que definir una superficie,



que puede ser de infinitas formas geométricas, por lo que para nuestro trabajo nos beneficiaba mucho. También permite trabajar con diferentes vistas, esto posibilita el continuo control del trabajo en su totalidad.

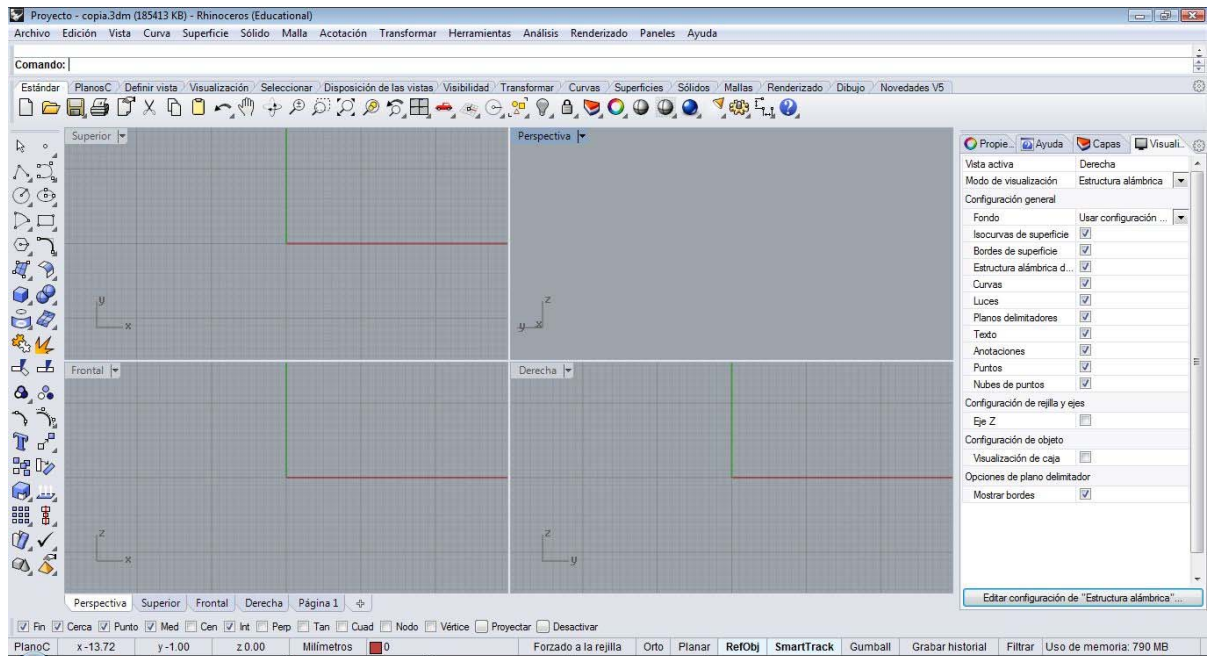


Figura 47. Rhinoceros.

Se trabajó exportando los resultados de la restitución (líneas y puntos) de Image Master a Rhinoceros mediante un fichero .dxf para tratar estas líneas intentando suavizarlas. A continuación se exponen unos ejemplos de estas líneas ya importadas en Rhinoceros y tratadas:

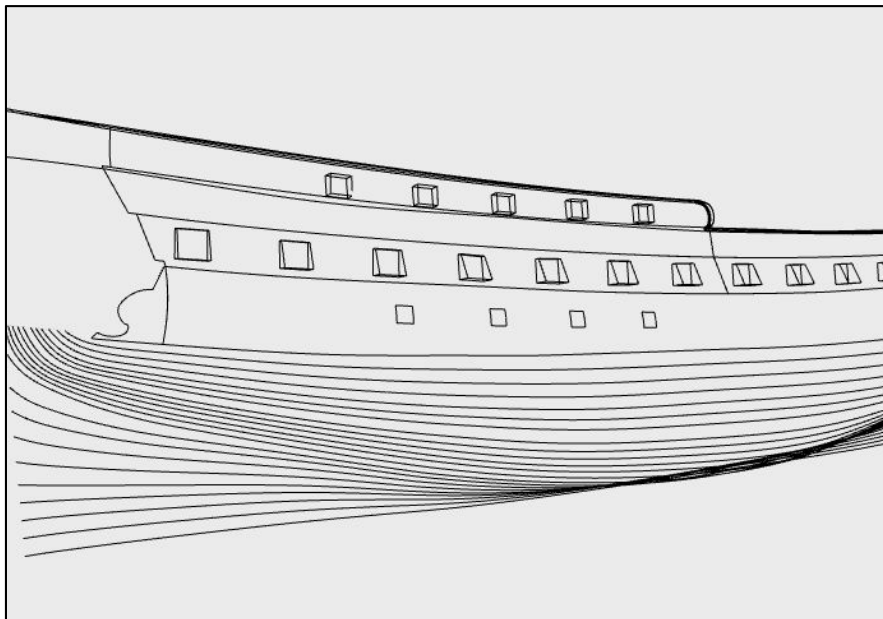


Figura 48. Líneas estribor.

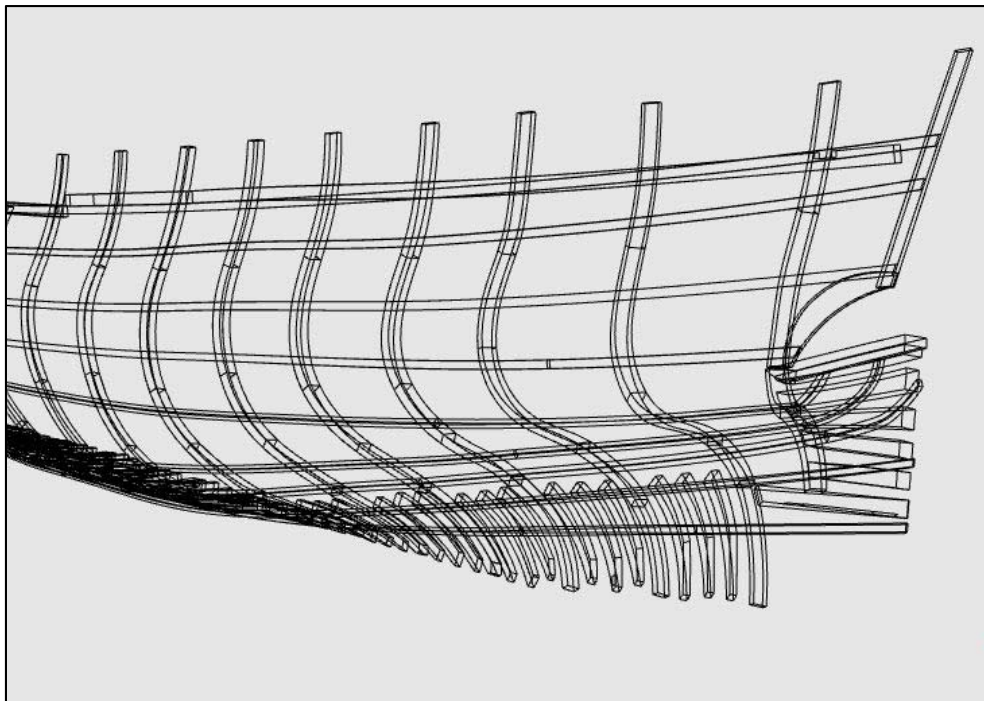


Figura 49. Líneas babor.

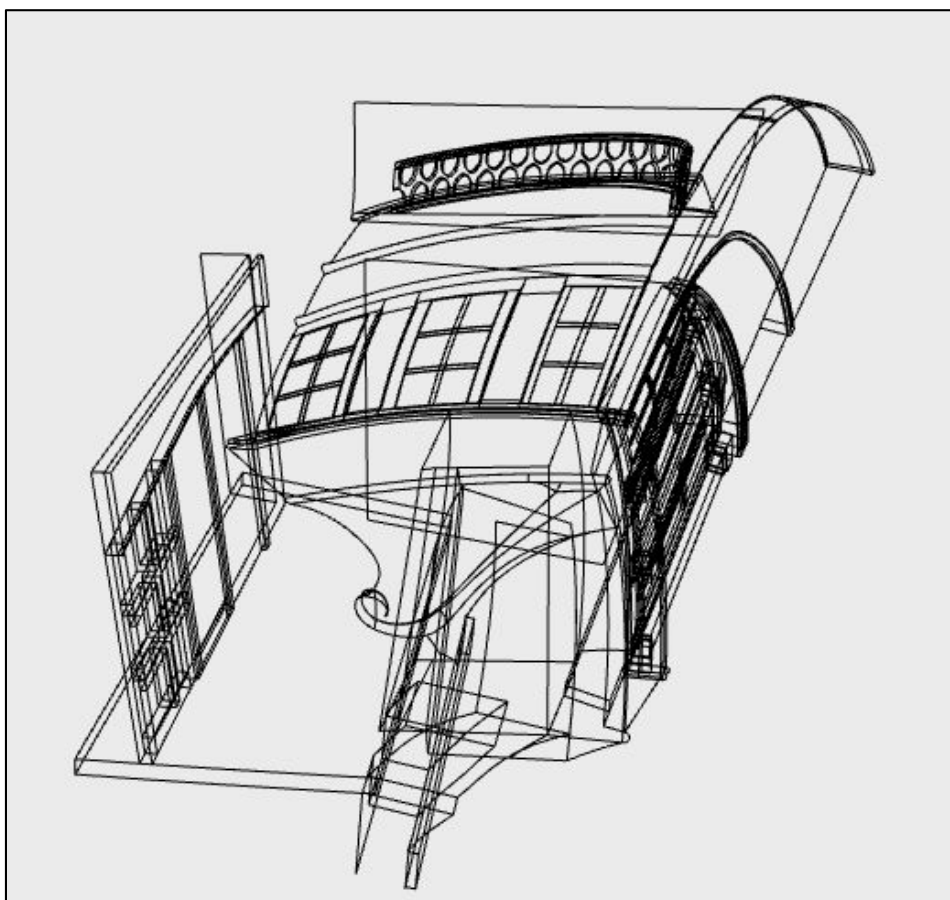


Figura 50. Líneas camarote.

Posteriormente con estas líneas se fueron creando las superficies necesarias hasta completar el modelado de la pieza.



Figura 51. Superficies estribor.

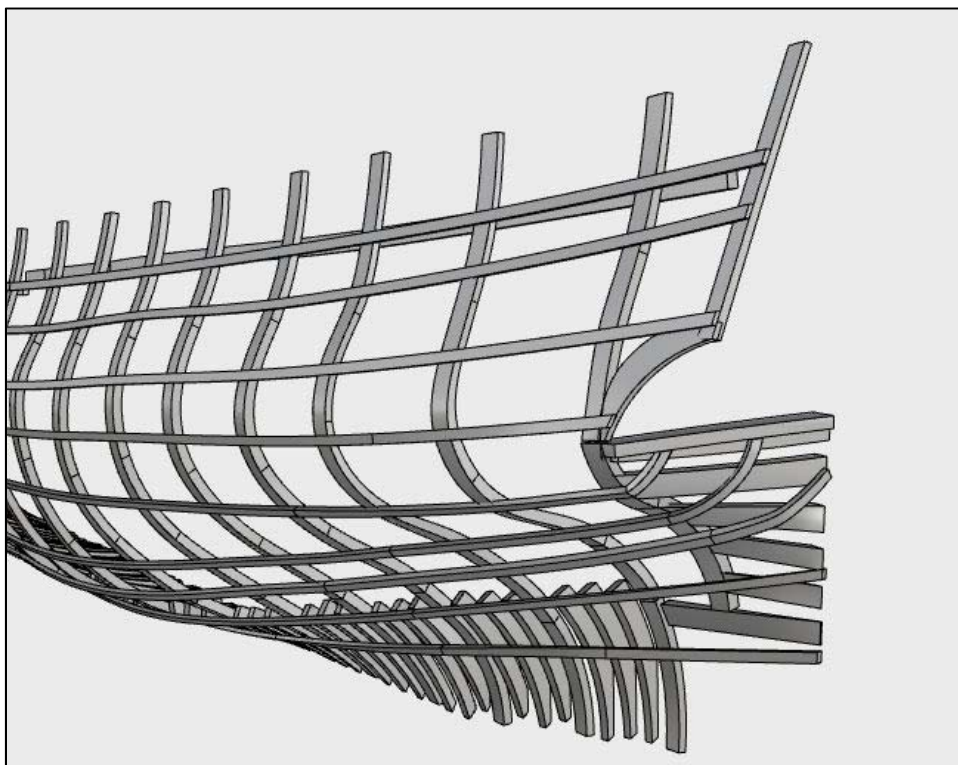


Figura 52. Superficies babor.

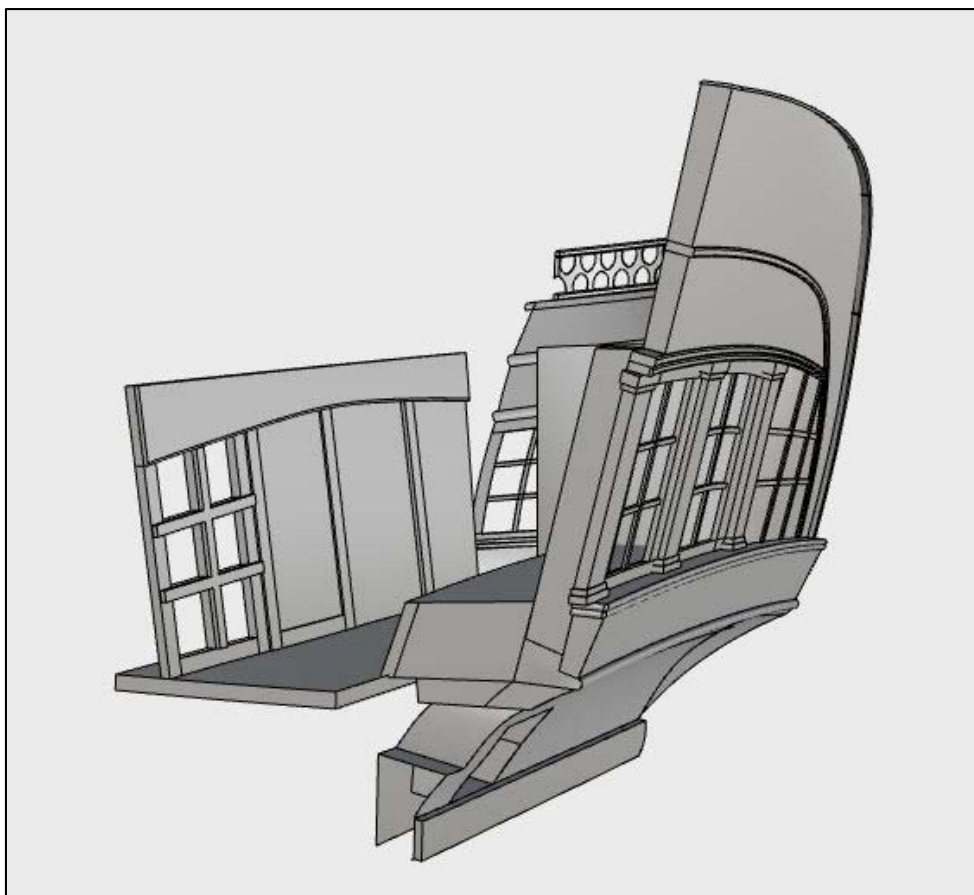


Figura 53. Superficies camarote.

Finalmente obtenos la representación del modelo completo:

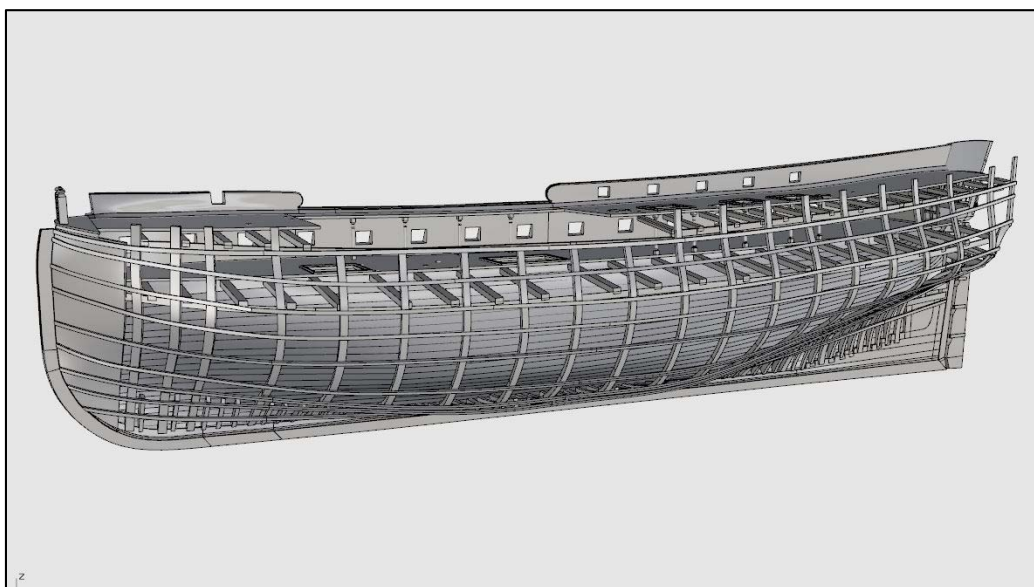


Figura 54. Modelo final. Vista babor.

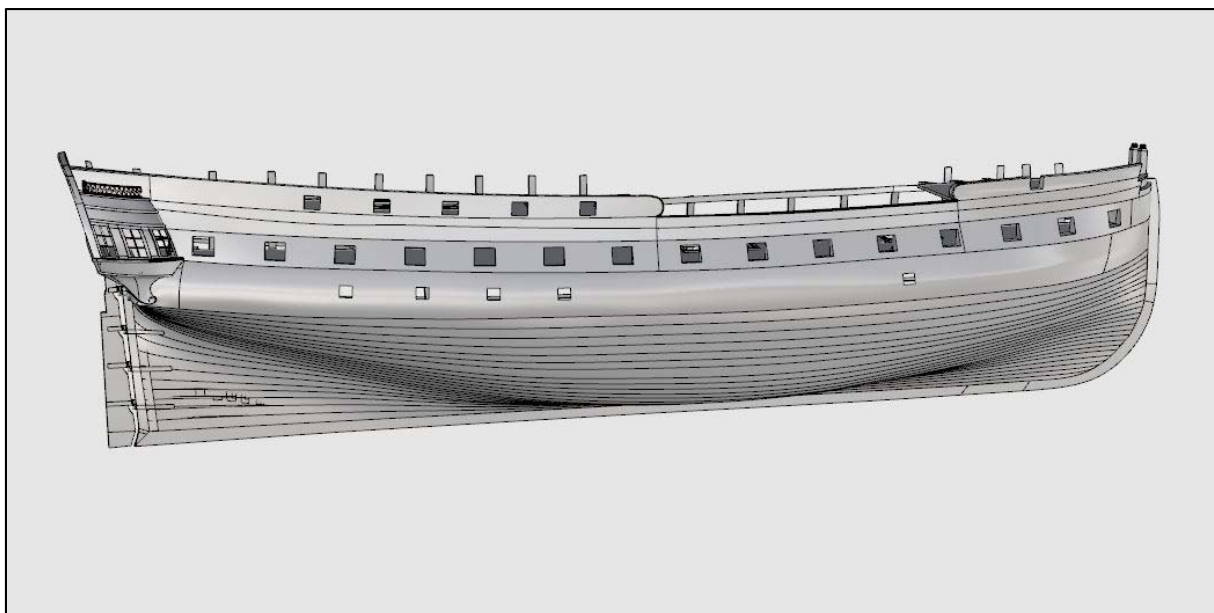


Figura 55. Modelo final. Vista estribor.

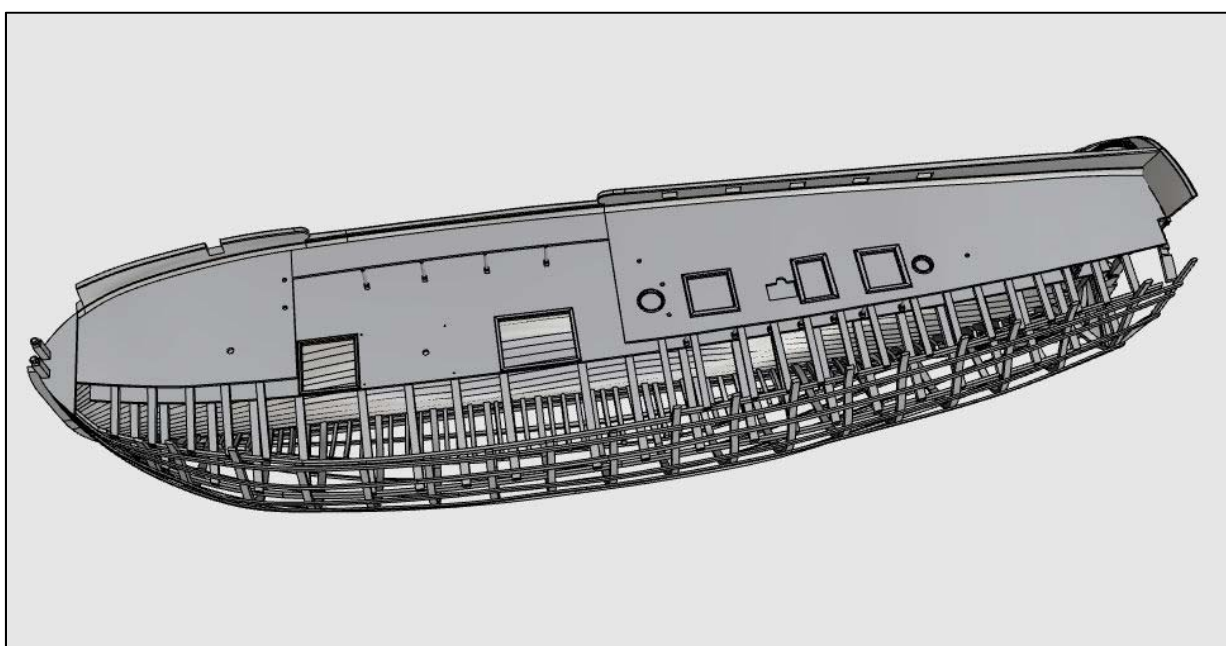


Figura 56. Modelo final. Vista cubierta.



4. PRESUPUESTO

Tabla de costes por hora en recursos humanos

Recurso humano	Euros/hora
Ingeniero Técnico en Topografía (campo)	56
Ingeniero Técnico en Topografía (gabinete)	31
Técnico en Restitución	19
Técnico de edición	12,5

Se establecen los costes por hora según la situación actual del mercado

Tabla con costes totales en recursos humanos

Recurso humano	Total de horas	Euros/hora	Cantidad	Total euros
Ingeniero Técnico en Topografía (campo)	8	56,25	3	1.350
Ingeniero Técnico en Topografía (gabinete)	40	31,25	1	1.250
Técnico Restitución	320	18,75	1	6.000
Técnico de edición	320	12,5	1	4.000
				12.600



Tabla de costes de materiales por precio unitario

Tipo	Concepto	Precio Unitario	Cantidad	Días	Total euros
Material Fotogramétrico	Cámara fotográfica	28	1	2	56
	Trípode	5	1	2	10
	Focos	12	3	1	36
Material Topográfico	Estación Leica TC1202	60	3	1	180
	Trípode	20	3	1	60
	Barra calibrada	100	1	1	100
					442

Tabla de costes de Licencias por precio unitario

Concepto	Precio Unitario	Días	Precio
Software Image Master	10	80	800
Software Rhinoceros	5	40	200
			1.000

Tabla resumen del presupuesto

Concepto	Coste
Recursos humanos	12.600
Materiales	442
Licencias de software	1.000
	14.042



	Parcial	Total euros
Beneficio empresarial (15%)	2.106,3	16.148,3
IVA (21%)	3.391,14	19.539,44
Total con IVA		19.539,44



5. CONCLUSIONES

Analizando la metodología empleada a lo largo de la realización de este proyecto, podemos destacar una serie de conclusiones que son:

- El proyecto que he realizado se trata de un trabajo real y completo, en el que he podido profundizar y poner en práctica los conocimientos de Fotogrametría y Topografía adquiridos en la carrera.
- La Fotogrametría, como técnica utilizada en este proyecto, permite la catalogación e inventariado de piezas de museo, sin la necesidad de una modelización urgente, puesto que la fuente de información es la fotografía, perdurable en el tiempo. De esta forma, se puede realizar el trabajo de captación de imágenes y el desarrollo de los modelos, atrasarlos en el tiempo en función de las necesidades, económicas, humanas o de otra índole.
- Es posible, y así ha quedado demostrado, utilizar cámaras no métricas para el levantamiento y modelización tridimensional de piezas de museo, con un coste mucho menor y sin que la precisión se resienta, frente a cámaras métricas o sistemas de escáner láser de corto alcance.
- Para ello, realizar un adecuado proceso de calibración geométrica es imprescindible, teniendo en cuenta que las cámaras tienen un comportamiento inestable en el tiempo, con lo que habría que realizarlo para cada proyecto, en función de las características geométricas del mismo y según una metodología verificada y contrastada.
- La realización del proyecto con tomas normales ha permitido la utilización de la visión estereoscópica, ideal para la extracción de elementos de difícil acceso visual dentro del modelo. Además, fue positivo añadir tomas convergentes para la toma de decisiones en la extracción de algunos otros.
- La utilización del software Image Master permitió la planificación del proyecto “cerrando” el objeto. De otra manera, se habría tendido a otra planificación, como la restitución “en relativas” y la sucesiva transformación de modelos al sistema local final.
- Por otro lado, el software Rhinoceros ha sido muy positivo a la hora de crear el modelo tridimensional, pues es un software muy interactivo y con mucha capacidad para este tipo de trabajos. Permite la creación de modelos a partir de un conjunto de líneas, con las que definir una superficie, que puede ser de infinitas



formas geométricas, por lo que para nuestro trabajo nos beneficiaba mucho, debido a la gran cantidad de detalles diferentes que tiene la pieza. También permite trabajar con diferentes vistas, esto posibilita el continuo control del trabajo en su totalidad.

- No ha sido posible la utilización de una herramienta tan poderosa como la correlación para la obtención de las superficies, debido al poco contraste del objeto. Como posible línea de mejora futura se podría intentar la proyección de patrones sobre el objeto, con el fin de producir contrastes en su superficie y provocar de esta manera la obtención de nubes de puntos mediante la correlación.
- Otra mejora futura podría ser la orientación directa del sensor, que incidiría en una reducción del trabajo fotogramétrico de orientación y de campo y redundaría en una menor interacción, si cabe, con el objeto.



ANEXOS

ANEXO I. Cálculos topográficos y fotogramétricos.

Debido al gran volumen de cálculos, estos se adjuntan en formato digital, en el CD que incluye esta memoria.

ANEXO II. Planos

- Plano planta cubierta
- Plano planta casco
- Plano alzado estribor
- Plano alzado babor

ANEXO III. Secciones

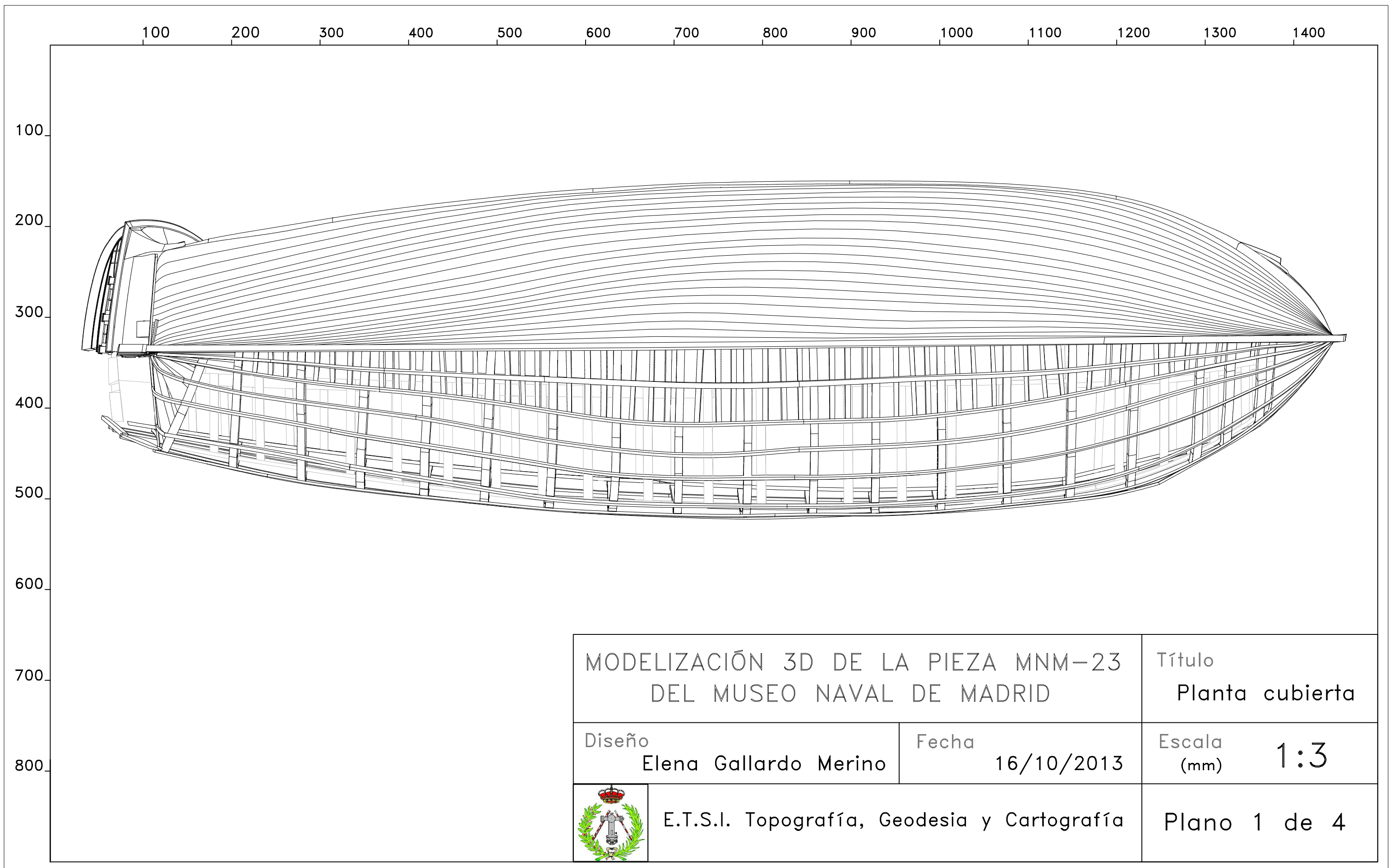
- Distribución de secciones
- Sección longitudinal
- Secciones transversales

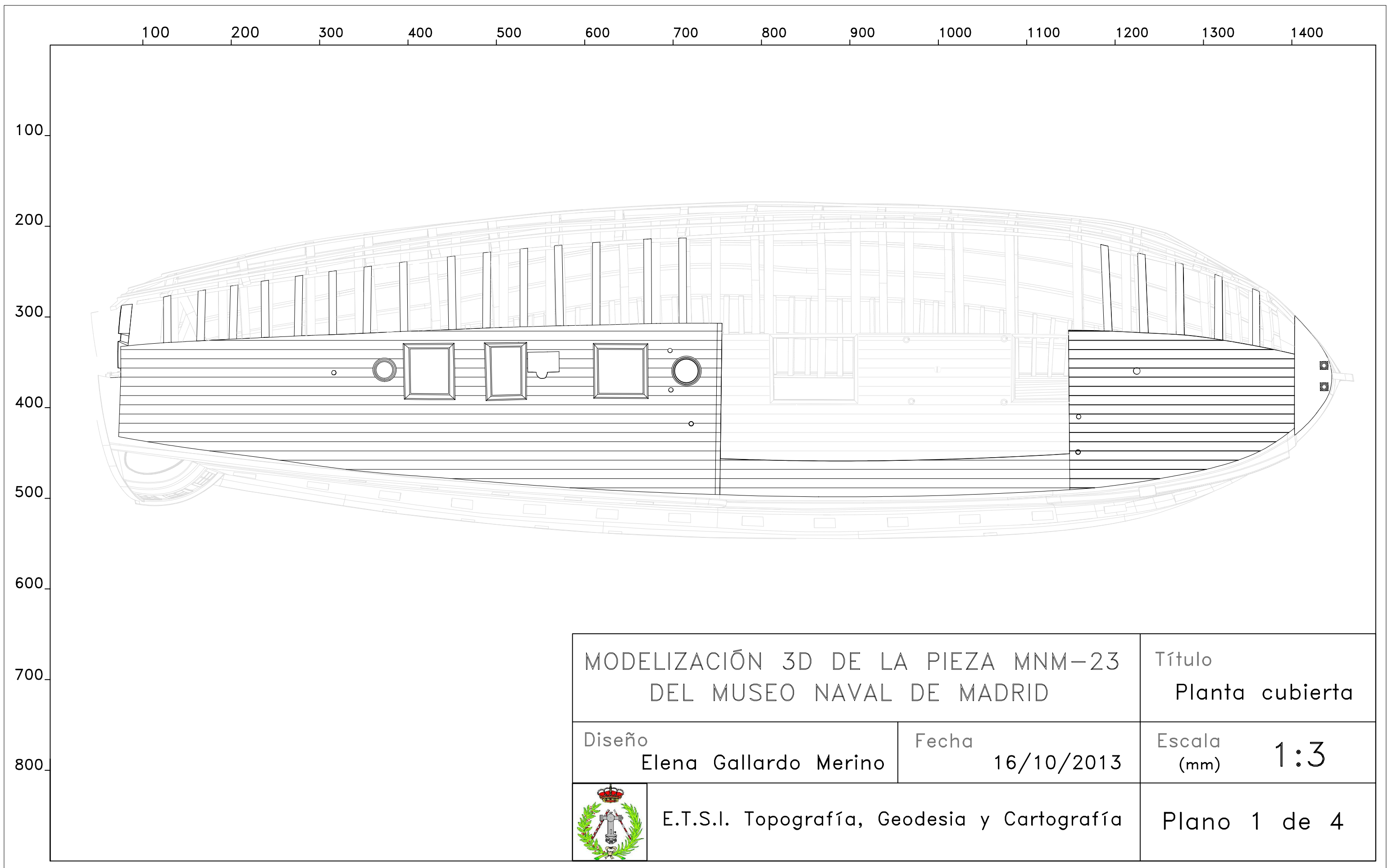


ANEXO II. Planos

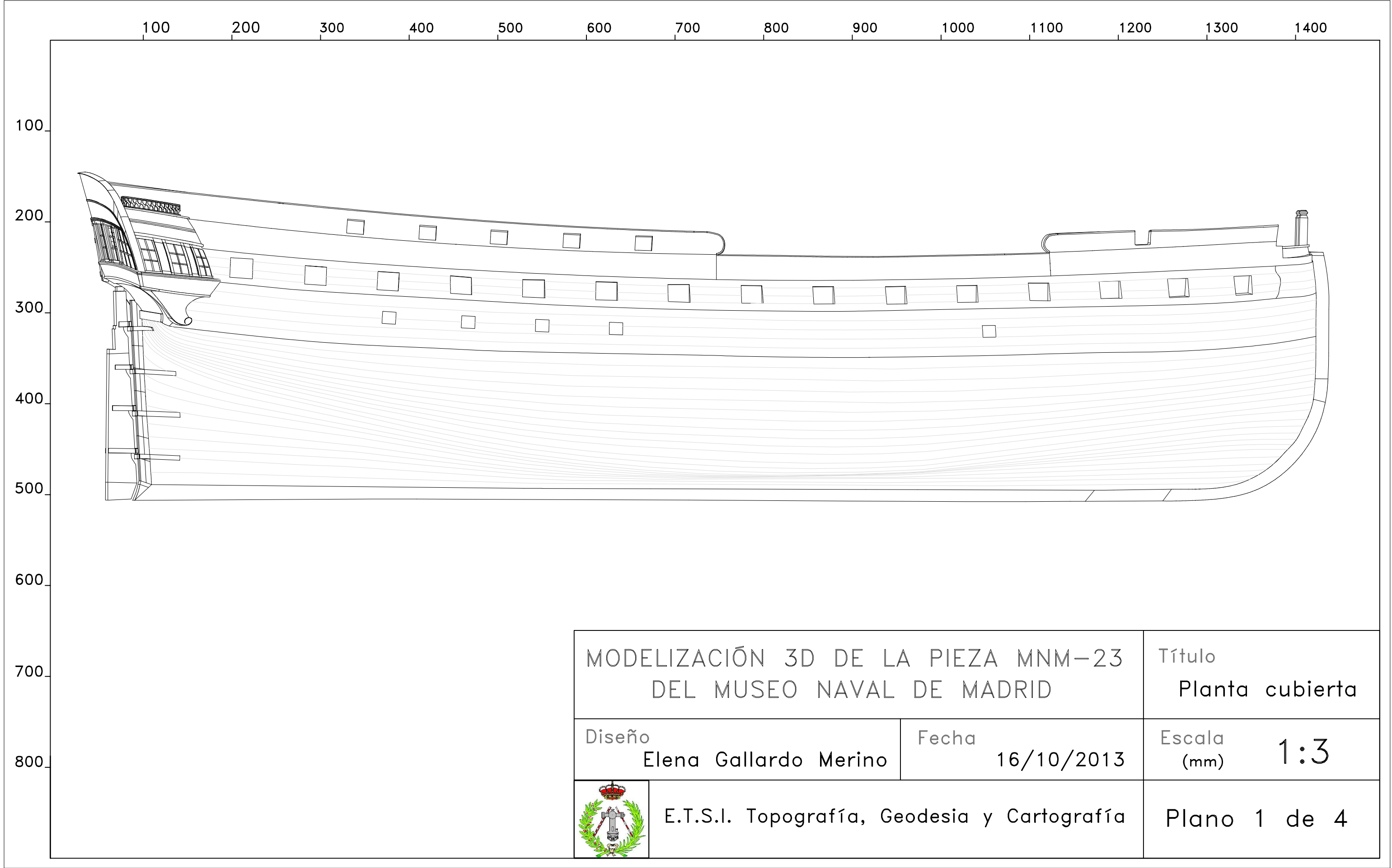


ANEXO III. Secciones





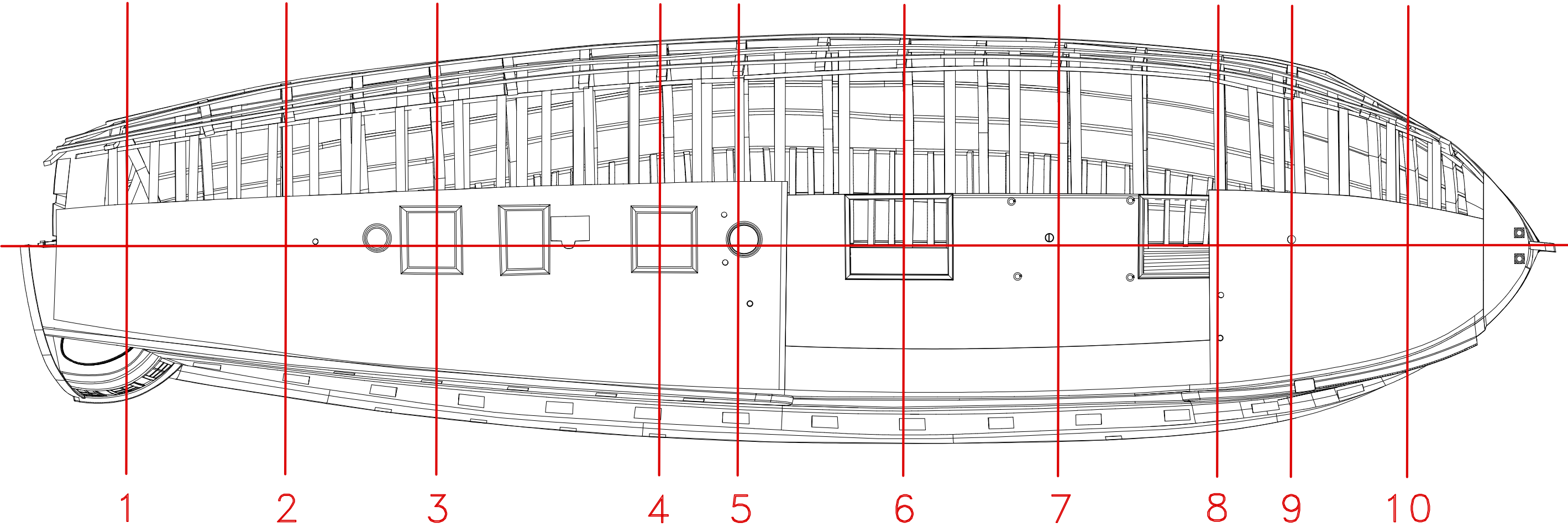
MODELIZACIÓN 3D DE LA PIEZA MNM-23 DEL MUSEO NAVAL DE MADRID		Título Planta cubierta
Diseño Elena Gallardo Merino	Fecha 16/10/2013	Escala (mm) 1:3
	E.T.S.I. Topografía, Geodesia y Cartografía	Plano 1 de 4



MODELIZACIÓN 3D DE LA PIEZA MNM-23 DEL MUSEO NAVAL DE MADRID		Título Planta cubierta
Diseño Elena Gallardo Merino	Fecha 16/10/2013	Escala (mm) 1:3
	E.T.S.I. Topografía, Geodesia y Cartografía	Plano 1 de 4

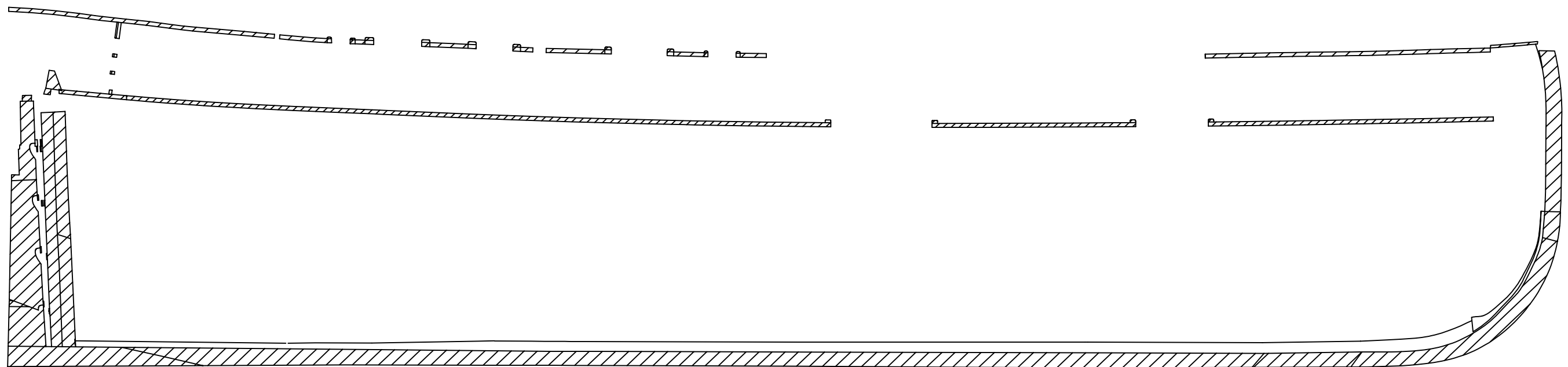
Distribución de Secciones Transversales

Escala 1:3

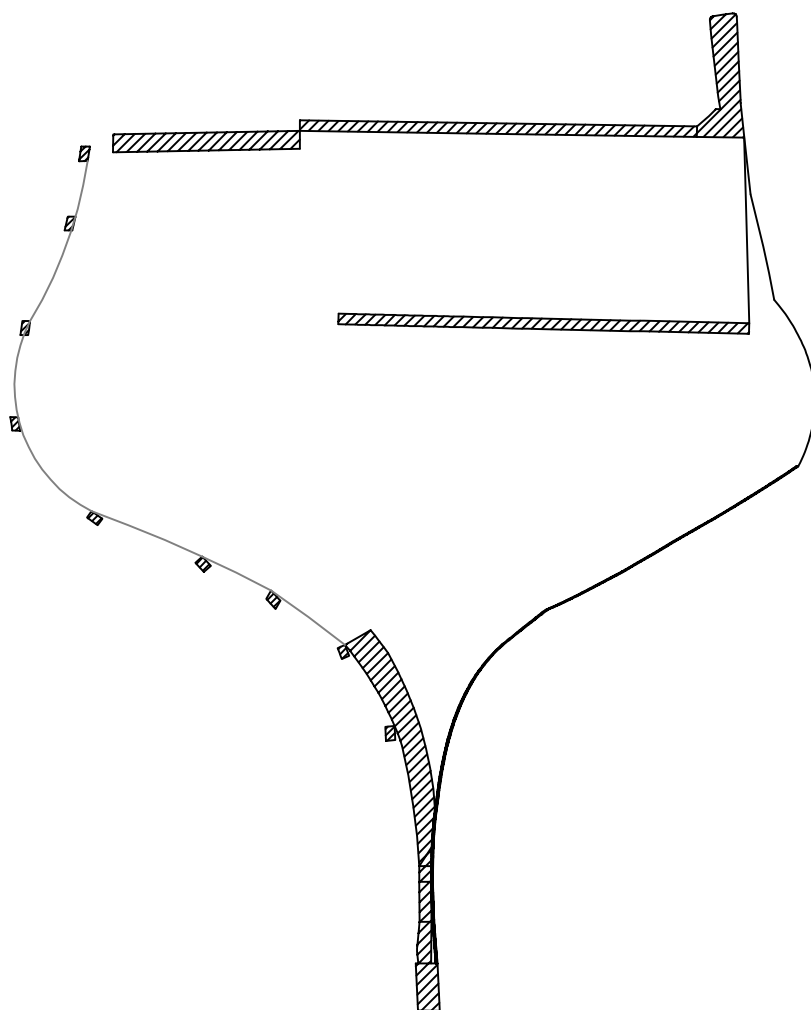


Sección Longitudinal

Escala 1:3

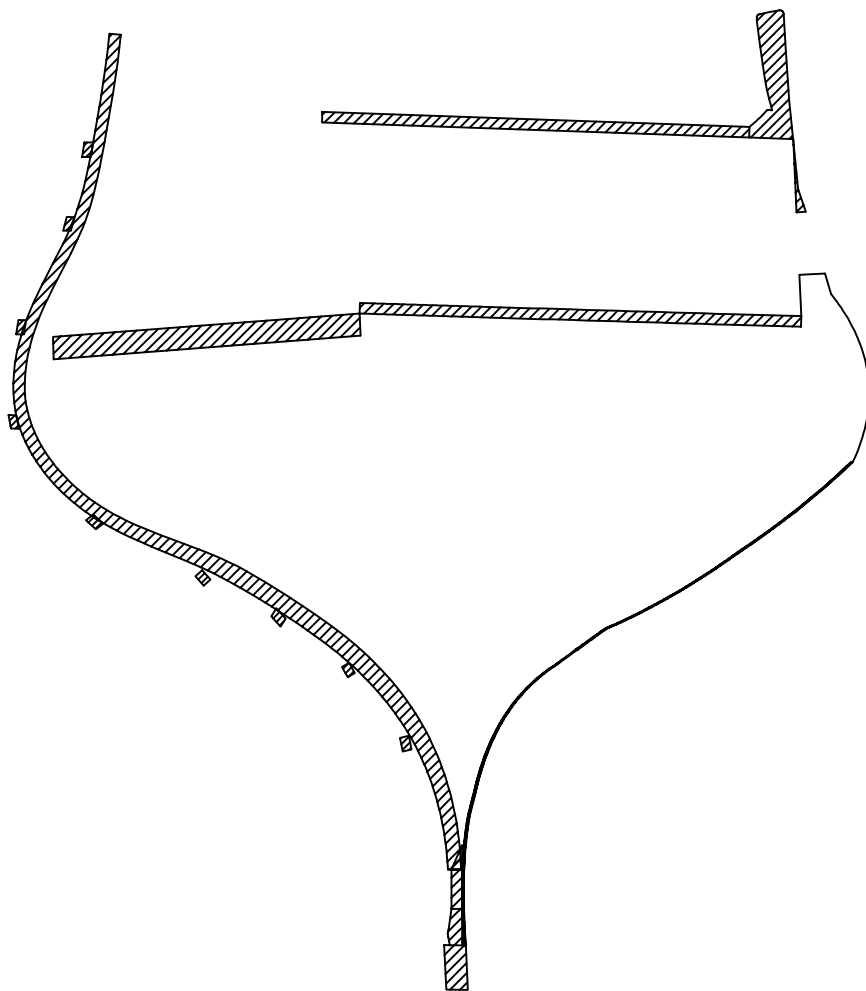


Sección Transversal 1 de 10



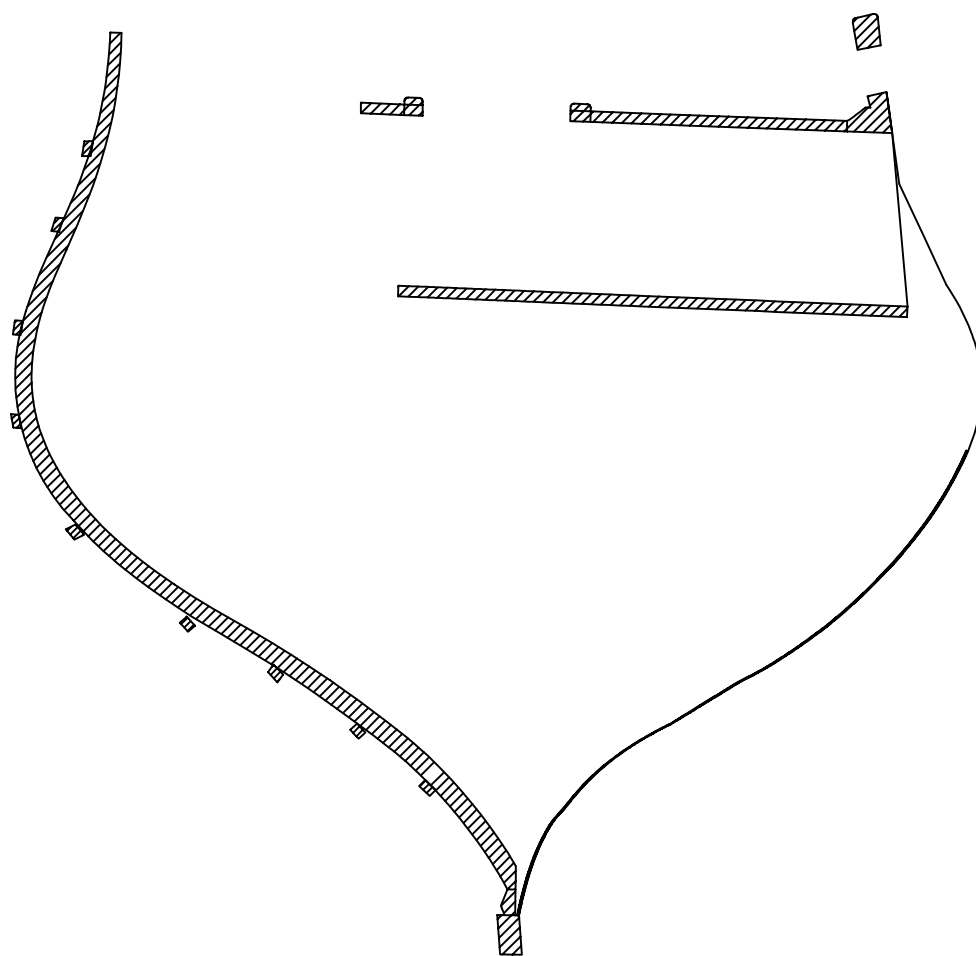
Escala 1:2

Sección Transversal 2 de 10



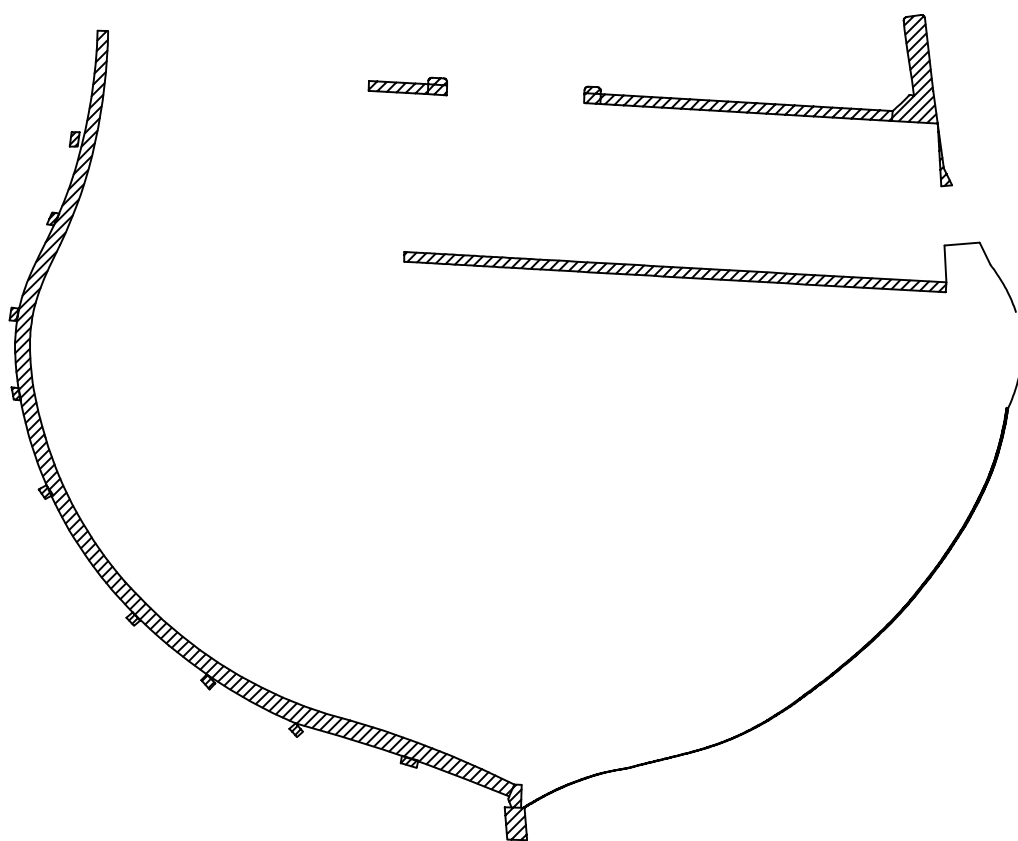
Escala 1:2

Sección Transversal 3 de 10



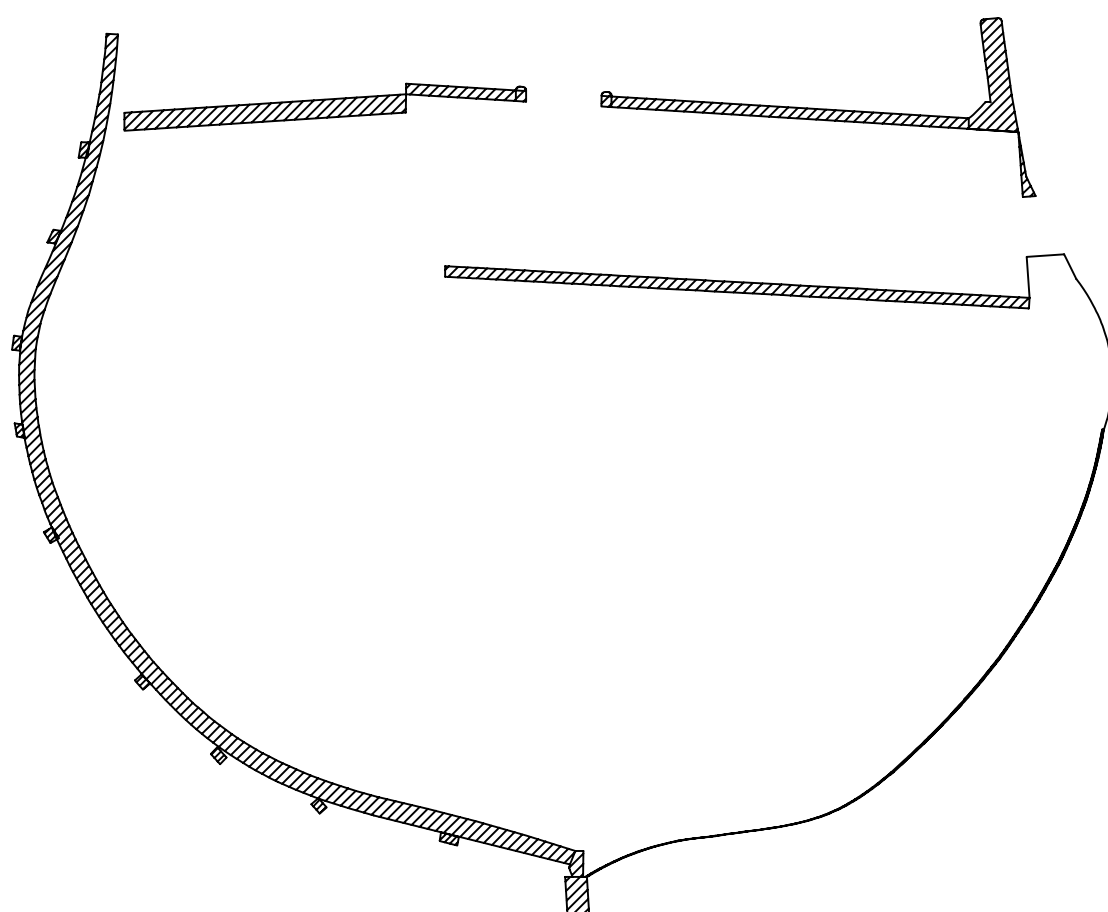
Escala 1:2

Sección Transversal 4 de 10



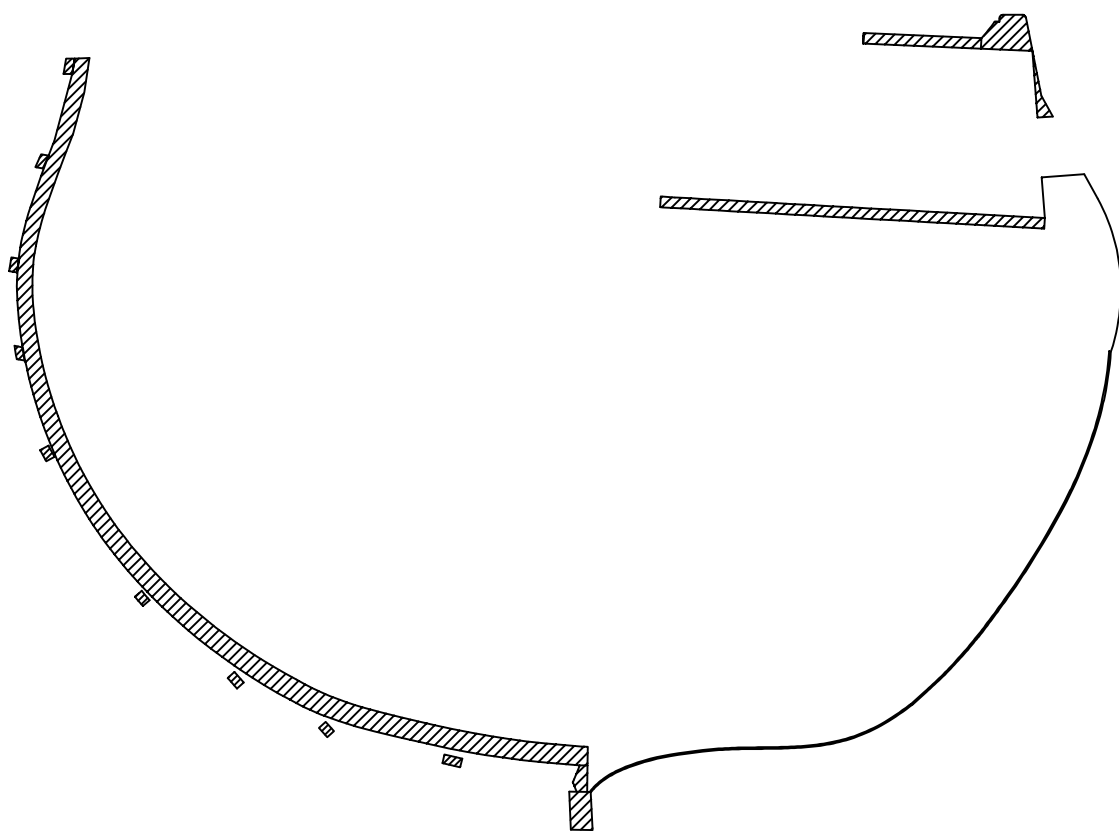
Escala 1:2

Sección Transversal 5 de 10



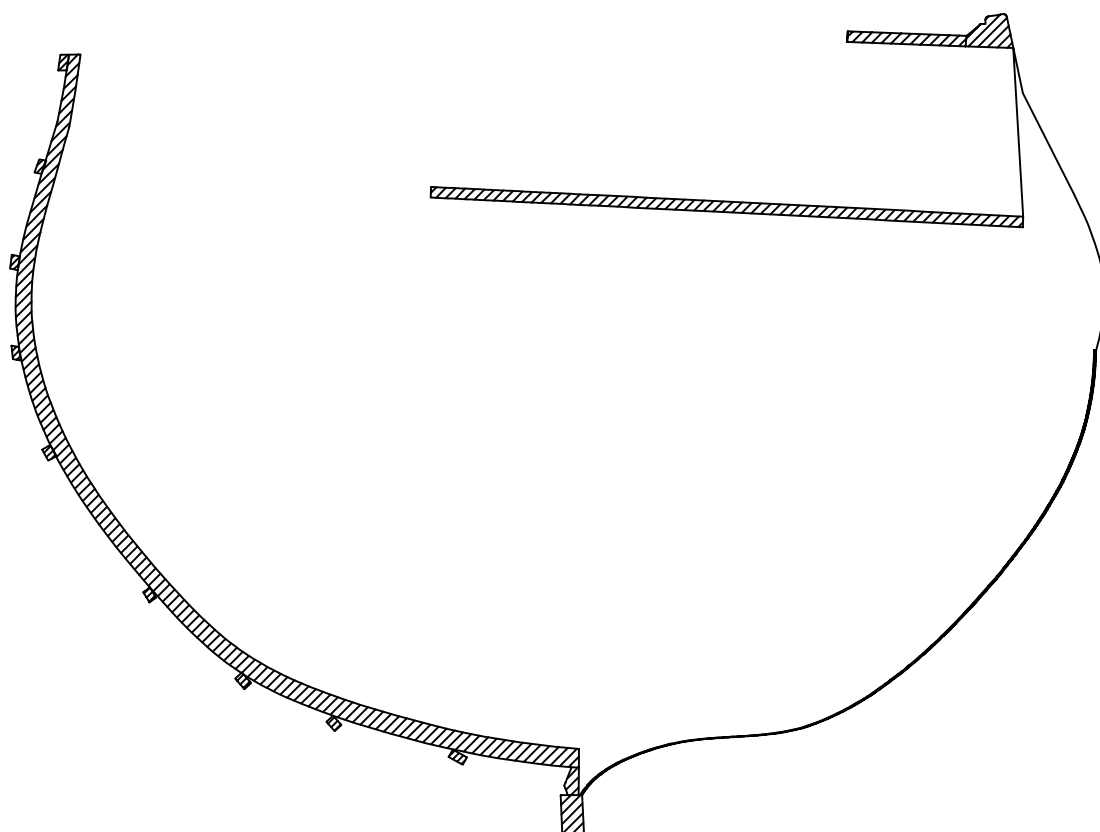
Escala 1:2

Sección Transversal 6 de 10



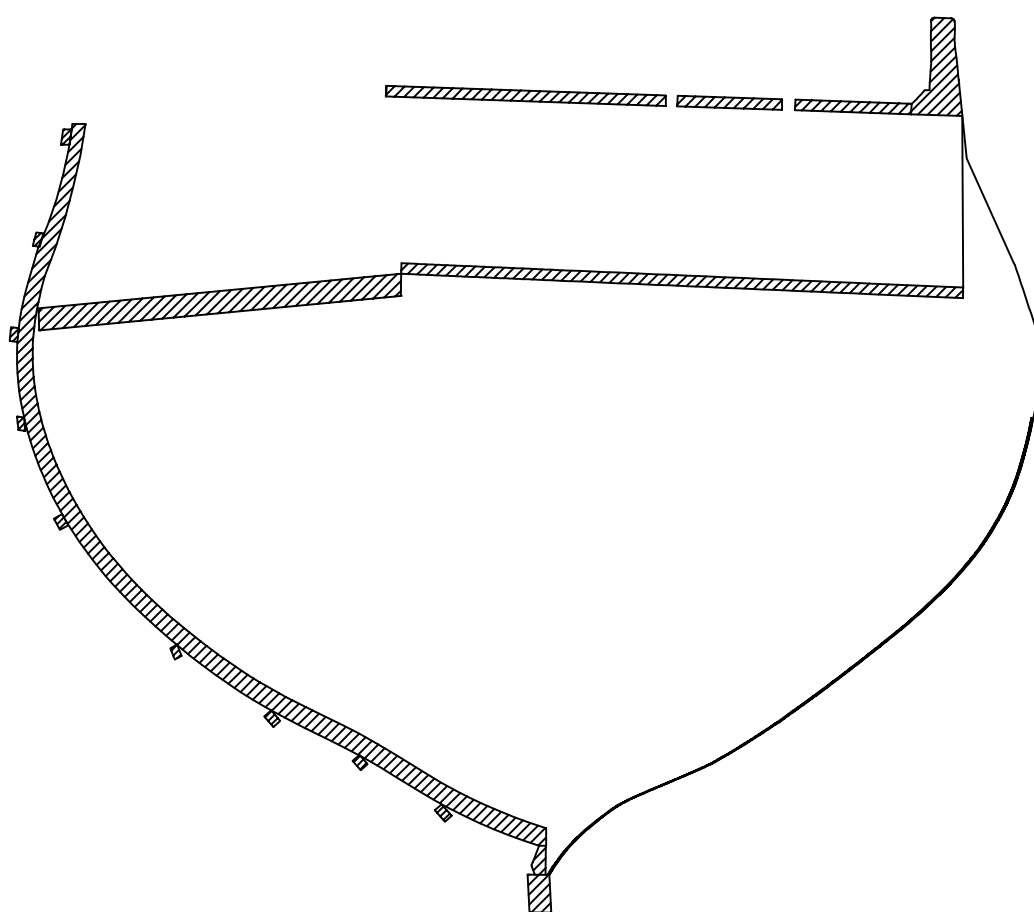
Escala 1:2

Sección Transversal 7 de 10



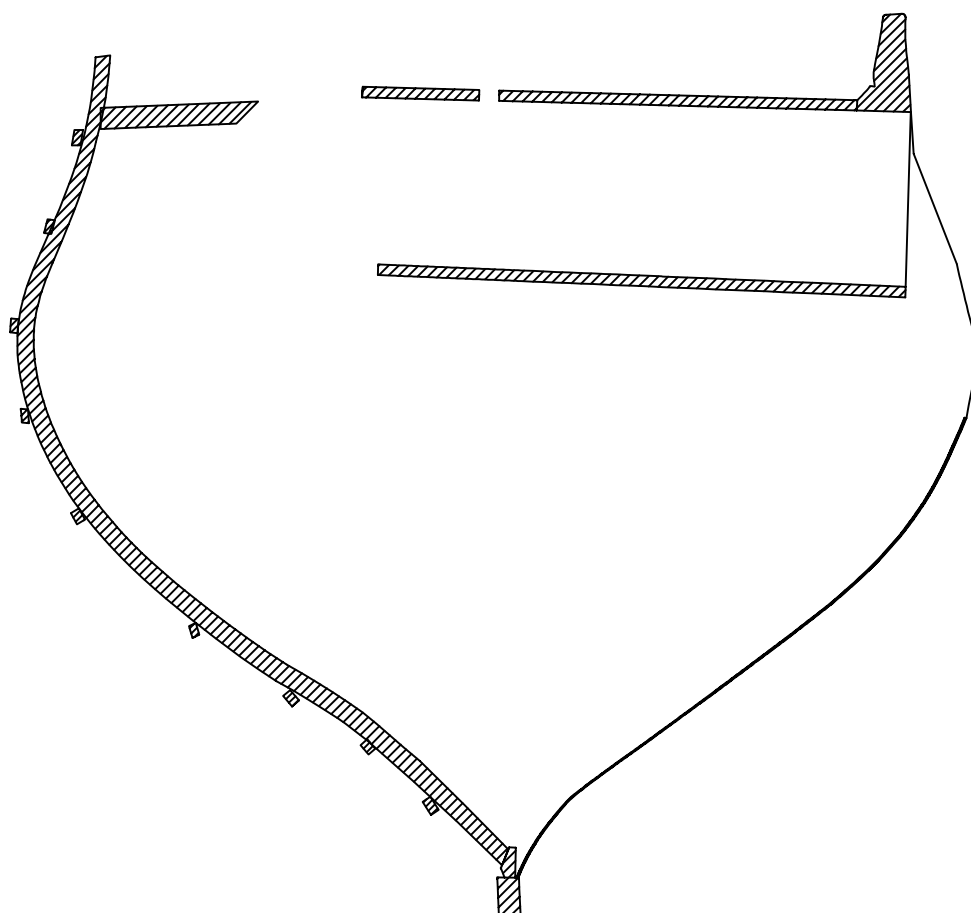
Escala 1:2

Sección Transversal 8 de 10



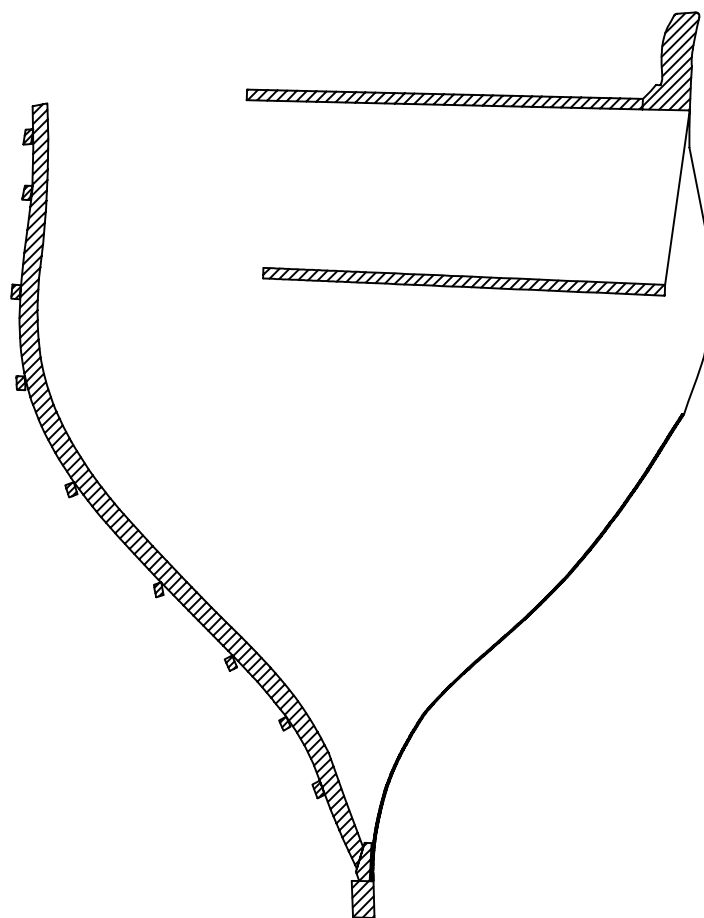
Escala 1:2

Sección Transversal 9 de 10



Escala 1:2

Sección Transversal 10 de 10



Escala 1:2